

FÁBIO MINORU YAMAJI

# **ANÁLISE FRACTAL DE UMA FLORESTA OMBRÓFILA MISTA ATRAVÉS DE IMAGENS DE SATÉLITE**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências Florestais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Christel Lingnau

CURITIBA  
2001



Universidade Federal do Paraná  
Setor de Ciências Agrárias - Centro de Ciências Florestais e da Madeira  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**  
Av. Lothário Meissner, 3400 - Jardim Botânico - CAMPUS III  
80210-170 - CURITIBA - Paraná  
Tel. (41) 360.4212 - Fax (41) 360.4211 - <http://www.pgfloresta.ufpr.br>  
e-mail: [pinheiro@floresta.ufpr.br](mailto:pinheiro@floresta.ufpr.br)

## PARECER

Defesa nº 420

A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após argüir o mestrando *FÁBIO MINORU YAMAJI* em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "ANÁLISE FRACTAL DE UMA FLORESTA OMBRÓFILA MISTA ATRAVÉS DE IMAGENS DE SATÉLITE", é de parecer favorável à **APROVAÇÃO** do acadêmico, habilitando-o ao título de *Mestre em Ciências Florestais*, na área de concentração em *Manejo Florestal*.



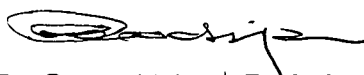
Dr. Christel Lingnau

Professora e pesquisadora do Departamento de Ciências Florestais da UFPR  
Orientadora e presidente da banca examinadora



Dr. Jorge Centeno

Professor e pesquisador do Departamento de Geomática da UFPR  
Primeiro examinador

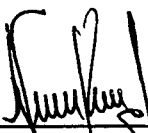


Dr. Carlos Vellozo Roderjan

Professor e pesquisador do Departamento de Ciências Florestais da UFPR  
Segundo examinador



Curitiba, 22 de fevereiro de 2000.



Nivaldo Eduardo Rizzi  
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal  
Franklin Galvão  
Vice-coordenador

## **AGRADECIMENTOS**

- Gostaria de agradecer à Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Christel Lingnau pela orientação dessa dissertação e pela indicação do tema que representou um desafio, mas, proporcionou a oportunidade para meu desenvolvimento científico e profissional.
- Quero agradecer, também, ao meu co-orientador, o Prof. Dr. Carlos Roberto Sanquetta, que em todos os momentos sempre esteve disponível.
- Meus agradecimentos especiais ao Prof. Dr. Celso Penteado Serra (PUC-PR), que durante um ano, voluntariamente, nos acompanhou e ensinou a teoria dos fractais. Espero que esse trabalho possa justificar o seu esforço, mas, acima de tudo, levo o Professor Celso como um exemplo para minha vida.
- Ao amigo, Prof. Dr. Nelson Yoshihiro Nakajima, que esteve presente nos momentos decisivos de minha carreira profissional e, particularmente, neste mestrado, foi meu conselheiro e o grande incentivador.
- Ao Prof. Dr. Roberto Tsuyoshi Hosokawa, pelo apoio e incentivo.
- Ao Prof. Dr. Flávio F. Kirchner, pelo apoio aos trabalhos realizados no laboratório de geoprocessamento.
- Ao Prof. M.Sc. Alessandro Camargo Angelo, que sempre esteve aberto para uma troca de idéias que resultaram em valiosas sugestões.
- À CAPES, pela bolsa concedida.
- À Industrias Pizzatto, que permitiu o desenvolvimento do trabalho em suas áreas.
- Aos Engenheiros Florestais Nilton Barth e Teddy, pelo espírito de companheirismo que demonstraram durante o trabalho de campo.
- À minha amiga Nazaré, com quem tive a felicidade de poder compartilhar todas as etapas deste trabalho, desde a busca pelos primeiros fragmentos até o último “clic” no teclado.
- Aos colegas de turma Ana Paula, Dennis, Eduardo, Norma, Regina e Valmir, que fizeram de cada aula um motivo de alegria.

E, especialmente, à minha esposa Akiko...por tudo!

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b>	i
<b>LISTA DE TABELAS</b>	iv
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	v
<b>RESUMO</b>	vi
<b>ABSTRACT</b>	vii
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	8
1.1 OBJETIVOS	9
1.1.1 Objetivo Geral	9
1.1.2 Objetivos Específicos	9
1.2 JUSTIFICATIVA	9
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b>	12
2.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS PAISAGENS	12
2.2 FRACTAIS	14
2.2.1 O que é o Fractal?	14
2.2.2 Dimensão Fractal	18
2.2.3 Cálculo da Dimensão Fractal	21
2.2.4 Análise de Pareto	24
2.2.5 Aplicações dos Fractais no Estudo da Vegetação	25
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b>	31
3.1 ÁREA DE ESTUDO	31
3.1.1 Clima	35
3.1.2 Solos	35
3.1.3 Vegetação	35
3.2 MATERIAL	38
3.2.1 Imagem de Satélite	38
3.2.2 Dados Complementares Sobre a Área de Estudo	38
3.3 METODOLOGIA	38
3.3.1 Trabalho de Campo	40
3.3.2 Pré-Processamento da Imagem de Satélite	45
3.3.3 Processamento da Imagem de Satélite	45
3.3.3.1 Análise da componentes principais	45
3.3.3.2 Definição das bandas a serem utilizadas	46
3.3.4 Classificação da Imagem de Satélite	46
3.3.5 Aplicação de Filtros	50
3.3.6 Análise Fractal	52
3.3.6.1 Análise da dimensão fractal	52
3.3.6.2 Análise do parâmetro de Pareto	53
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	55
4.1 COMPONENTES PRINCIPAIS	55
4.2 SELEÇÃO DAS BANDAS	57
4.3 ANÁLISE DA SEPARABILIDADE	57
4.4 CLASSIFICAÇÃO	59
4.5 PREPARO DA IMAGEM PARA A ANÁLISE FRACTAL	61

4.6	DIMENSÃO FRACTAL "D"	64
4.7	PARÂMETRO DE PARETO "a"	66
4.8	ANÁLISE FRACTAL	69
5	CONCLUSÕES	78
6	RECOMENDAÇÕES	79
	REFERÊNCIAS	80
	ANEXOS	86

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - DISTRIBUIÇÃO DAS ÁREAS DAS FAZENDAS.....	32
TABELA 2 - SOFTWARE UTILIZADO.....	38
TABELA 3 - RESULTADO DA ANÁLISE DAS COMPONENTES PRINCIPAIS ...	55
TABELA 4 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO.....	57
TABELA 5 - ÍNDICES DE ACURÁCIA PARA AS TRÊS CLASSIFICAÇÕES.....	57
TABELA 6 - VALORES DE "D" PARA AS OITO CLASSES.....	65
TABELA 7 - VALORES DO PARÂMETRO DE PARETO "a".....	68
TABELA 8 - ANÁLISE FRACTAL DAS OITO CLASSES (SEM FILTRO).....	70
TABELA 9 - ANÁLISE FRACTAL (COMBINAÇÃO DE FILTROS).....	70
TABELA 10 - ANÁLISE FRACTAL (FILTRO DE MODA).....	70
TABELA 11 - QUADRO RESUMO PARA ANÁLISE FRACTAL.....	72

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- UM FRACTAL MOSTRADO PELA CURVA DE KOCH.....	19
FIGURA 2 - PRINCÍPIO DO CÁLCULO DA DIMENSÃO FRACTAL "D".....	21
FIGURA 3 - EXEMPLOS DE CÁLCULO DA DIMENSÃO FRACTAL "D".....	22
FIGURA 4 - COMPARAÇÃO ENTRE REGIÕES (ÁREA E PERÍMETRO).....	23
FIGURA 5 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	31
FIGURA 6 - FLUXOGRAMA DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS.....	39
FIGURA 7 - ASPECTO DE UMA ÁREA DE BANHADO.....	42
FIGURA 8 - ASPECTO GERAL DE UMA CAPOEIRA.....	42
FIGURA 9 - ÁREA DE PINUS.....	43
FIGURA 10 - ÁREA DE CAMPO COM ARAUCÁRIA.....	43
FIGURA 11 - ASPECTO GERAL DE FOLHOSAS COM ARAUCÁRIA.....	44
FIGURA 12 - ÁREA DE ARAUCÁRIA DENSE.....	44
FIGURA 13 - IMAGEM CLASSIFICADA DA ÁREA DE ESTUDO (RGB-543).....	60
FIGURA 14 - IMAGEM CLASSIFICADA E FILTRADA.....	62
FIGURA 15 - GRÁFICO DO $\ln$ ÁREA X $\ln$ PERÍMETRO.....	65
FIGURA 16 - GRÁFICO DA ÁREA X <i>RANKING</i> .....	67
FIGURA 17 - GRÁFICO DO $\ln$ ÁREA X $\ln$ <i>RANKING</i> .....	67
FIGURA 18 - GRÁFICO DE "D" X "a" (SEM FILTRAGEM).....	74
FIGURA 19 - GRÁFICO DE "D" X "a" (COMBINAÇÃO DE FILTROS).....	74
FIGURA 20 - GRÁFICO DE "D" X "a" (FILTRO DE MODA).....	75
FIGURA 21 - GRÁFICO DE "D" X "a" (VALORES MÉDIOS).....	75

## RESUMO

A paisagem da região sul do Brasil é formada por floresta, campo, água e agricultura entre outros. Mesmo com essa heterogeneidade, o estudo de qualquer elemento da paisagem está relacionado com o todo, tornando-se imprescindível o entendimento dos padrões que compõem essa paisagem. Uma das dificuldades encontradas nas análises desses padrões espaciais, era definir e quantificar as formas irregulares descritas pela natureza. No entanto, desde que Mandelbrot introduziu a teoria dos fractais em 1975, a geometria fractal tem sido utilizada para tratar dessas variações espaciais. Esta pesquisa utilizou os fractais para analisar o padrão da paisagem de uma Floresta Ombrófila Mista localizada no município de General Carneiro - PR. A partir da imagem classificada do Landsat-5 TM, determinou-se os índices da dimensão fractal "D" e do parâmetro de Pareto "a" para cada tipologia. O cálculo da dimensão fractal "D" foi baseado na relação área-perímetro, e o parâmetro de Pareto na relação entre áreas. Com a análise fractal foi possível associar o padrão de cobertura com tais índices. Os resultados mostraram que os fragmentos de araucária são os maiores (" $a \cong 16,5$ ") e têm as bordas mais sinuosas (" $D \cong 1,42$ "). Os menores fragmentos são de capoeira (" $a \cong 13,3$ "), e a classe água tem os fragmentos com as bordas mais simples (" $D \cong 1,25$ "). Este estudo mostrou que a análise fractal fornece índices que diminuem o grau de subjetividade na avaliação e entendimento da fragmentação da paisagem.

Palavras-chave: padrões de paisagem, fragmentação, análise fractal, Floresta Ombrófila Mista.



## ABSTRACT

The Brazilian south region landscape is composed by fragments of forest, grassland, water and agriculture. In spite of this heterogeneity, the study of any element in this landscape is related to the whole. Therefore, it is important to understand landscape pattern. One of the difficulties to verify these spatial patterns was to define and to quantify the irregular shapes described by the nature. Yet, from the fractal theory, introduced by Mandelbrot in 1975, the fractal geometry has been used to solve the problem of spatial variability. This research aimed the use of fractals to analyze the landscape pattern of a forest located in General Carneiro District, Paraná State, called Mixed Araucária Forest. From the classified Landsat-5 TM image, the fractal dimension "D" and the Pareto parameter "a", for each class, were determined. The estimated fractal dimension "D" was based on relationship of perimeters and areas. The Pareto index was based on relationship of areas. By using the fractal analysis was possible to relate land cover pattern and estimated indices. The results showed that Araucária has the largest fragments (" $a \cong 16,5$ ") and more complicated perimeters (" $D \cong 1,42$ "). The smaller fragments (" $a \cong 13,3$ ") are brush, and water has smoother perimeter (" $D \cong 1,25$ "). This study demonstrated that fractal analysis provide indices to reduce the subjectivity level in the evaluation and understanding of the landscape fragmentation.

Key words: landscape patterns, fragmentation, fractal analysis, Mixed Araucária Forest.

## 1 INTRODUÇÃO

As técnicas de processamento digital de imagens têm contribuído para aumentar o interesse no estudo dos padrões da vegetação, e também têm auxiliado a pesquisa para entender o papel da heterogeneidade da paisagem na dinâmica dos ecossistemas (WALSH e DAVIS, 1994).

De acordo com LaGRO (1991) e WIENS (1995), o grande desafio no estudo da paisagem está no entendimento de como a sua complexa estrutura espacial afeta os processos e os padrões da vegetação. Entretanto, apesar de toda a atenção dispensada aos padrões espaciais, heterogeneidade e formas, poucos trabalhos têm sido feitos sobre a estrutura espacial desses mosaicos e seus efeitos ecológicos.

Uma das razões dessas características espaciais não serem muito empregadas, são os próprios padrões determinados pela natureza, que são inúmeros e não podem ser descritos por formas simples como linhas, planos e cubos, entre outras. A grande dificuldade encontrada na análise espacial, era como definir ou quantificar todas essas formas irregulares descritas pela natureza. No entanto, desde que Mandelbrot introduziu a teoria dos fractais em 1975, a geometria fractal tem sido uma ferramenta útil para tratar dessas variações espaciais, trazendo para os ecologistas, assim como para os matemáticos e outros cientistas, uma alternativa para a descrição desses padrões (PALMER, 1988).

Assim sendo, utilizou-se neste estudo os fractais para analisar uma paisagem florestal da região sul do Brasil, que é composta por floresta, campo, água e banhado, entre outros. Mesmo com essa heterogeneidade, o estudo de qualquer elemento dessa paisagem está relacionado com a sua estrutura. Portanto, torna-se imprescindível o entendimento dos componentes e das estruturas, e os fractais podem auxiliar, fornecendo índices para a interpretação dessa paisagem.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Através da aplicação da análise fractal numa imagem classificada do satélite Landsat-5 TM, encontrar parâmetros que possam caracterizar a fragmentação da paisagem em uma área de Floresta Ombrófila Mista.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Este estudo teve como objetivos específicos:

- verificar a viabilidade da aplicação da dimensão fractal "D" e do parâmetro de Pareto "a", para descrever as diferentes tipologias encontradas numa área de ocorrência de Floresta Ombrófila Mista;
- analisar o comportamento dos índices de dimensão fractal "D" e do parâmetro de Pareto "a", em função dos diferentes processos de filtragem aplicados na imagem.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

As técnicas de sensoriamento remoto podem contribuir significativamente para a aquisição de dados dos complexos padrões que são definidos pela vegetação. Através da identificação desses padrões, ou mesmo das suas tendências espaciais, pode-se estabelecer relações e caracterizações que podem ser úteis para o entendimento do desenvolvimento de uma paisagem.

Segundo HAINES-YOUNG et al. (1993), as tecnologias como o Sistema de Informações Geográficas - SIG, o sensoriamento remoto e outros sistemas computacionais para manipulação de informações, permitem o desenvolvimento de idéias, novas ferramentas e conceitos para o estudo da ecologia da paisagem.

A paisagem, segundo FORMAN e GODRON (1986), é uma área heterogênea, onde os seus fragmentos variam em tamanho, forma, número, tipo e

configuração. Determinar essa distribuição espacial é essencial para entender a estrutura da paisagem .

No entanto, a idéia de que a heterogeneidade da paisagem é um fator dominante que influencia os processos ecológicos não foi empregada até o início dos anos 90. Quando essa idéia passou a ser aceita, os modelos até então utilizados tiveram que ser modificados para representar a realidade da natureza (HANSSON et al., 1995).

No mundo atual, massivas transformações têm ocorrido na cobertura vegetal da terra. Áreas onde o padrão tradicional da paisagem permaneceu estável por longos períodos, ou que sofreu apenas pequenas mudanças em muitas gerações, agora estão sendo rapidamente alteradas. As conseqüências de tais mudanças podem ser profundas, com efeitos sobre o clima, água, ar, processos de desertificação, a própria população humana, enfim, sobre os sistemas essenciais de suporte para a vida. O estudo para entender o significado dessas mudanças pode ser chamado de "ecologia da paisagem" (HAINES-YOUNG et al., 1993). Esse termo recebe ainda várias definições dependendo do autor. FORMAN e GODRON (1986) definem ecologia da paisagem como o estudo da estrutura, função e mudanças numa área heterogênea, composto pela interação de ecossistemas. Ainda segundo HAINES-YOUNG et al. (1995), o mais importante não são as definições, mas como esses conceitos e teorias poderão ajudar a entender o mundo que está à nossa volta.

A análise fractal é um desses conceitos que, juntamente com outras ferramentas como o Sistema de Informações Geográficas - SIG e o sensoriamento remoto, aplicadas no estudo de florestas, pode fornecer índices que venham a contribuir para explicar como está a distribuição de uma espécie, qual é o grau de fragmentação, quais as influências dessa fragmentação sobre as espécies, enfim, para melhor compreender a ecologia da paisagem.

A ecologia da paisagem tem enfatizado a importância das relações entre os padrões espaciais e os processos ecológicos. Assim sendo, o estudo da paisagem necessita de métodos para quantificar os padrões espaciais, para comparar paisagens, identificar diferenças significantes e determinar as relações

funcionais entre os padrões da paisagem. Para isso, o estudo da paisagem utiliza várias técnicas, dentre as quais inclui-se a análise fractal (TURNER e GARDNER, 1991).

A dimensão fractal vem se tornando um índice cada vez mais empregado, principalmente, no monitoramento da paisagem. No entanto, esta técnica ainda não está sendo muito aplicada no Brasil. No levantamento bibliográfico realizado para este estudo, verificou-se a existência de várias citações internacionais (ver item 2.2.5), mas apenas um artigo (BATISTELLA e SOARES, 1999), relacionando uma floresta brasileira com os fractais, foi encontrado.

De acordo com a literatura, nos últimos anos, pesquisadores vêm aplicando a análise fractal no estudo dos fragmentos florestais ou da paisagem em geral. Conforme o levantamento bibliográfico, esta técnica ainda não foi aplicada no estudo da paisagem de florestas brasileiras. Dessa forma, acompanhando a evolução das teorias em estudos de paisagem florestal, é oportuno a utilização da análise fractal neste trabalho, para verificar as possibilidades da aplicação desta técnica para caracterizar a paisagem em uma área de Floresta Ombrófila Mista.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS PAISAGENS

O estudo da paisagem está direcionado para as relações entre os padrões espaciais, padrões temporais e processos ecológicos. O efeito dessas configurações espaciais nos processos ecológicos é fundamental. Escalas temporais e espaciais são tão amplas, quanto necessárias para a compreensão dos sistemas que formam esses mosaicos, que podem ser muito heterogêneos (MERRIAM, 1995).

Para NOSS (1995), a natureza nunca é uniforme. Seja em qualquer escala espacial que se examine a natureza, encontram-se detalhes. Por exemplo, quando se observa uma paisagem com milhões de hectares e, através de uma ampliação, aproxima-se dela até que se consiga a inspeção detalhada de um metro quadrado, pode-se ver que padrões em diferentes escalas foram sobrepostos um sobre os outros. A superfície terrestre é praticamente uma série sem fim de mosaicos sobre mosaicos. A escala ou nível de resolução dependerá dos objetivos que se buscam em cada trabalho. Não existe uma escala única fundamental.

De acordo com RYN e COWAN (1996), nos métodos convencionais, para o estudo da paisagem, trabalhava-se apenas com uma escala de cada vez. No entanto, os processos naturais estão inerentemente ligados à escala. A natureza é dinâmica, e matéria e energia estão num fluxo contínuo através das escalas. Por causa desta característica, houve a necessidade de se integrar o estudo da paisagem, também, através de múltiplas escalas para fazer com que os processos ficassem compatíveis com a natureza. Ainda segundo os autores, a integração do design ecológico através de múltiplas escalas, refletindo a influência de grandes escalas em pequenas e de pequenas em grandes, pode ser feita através dos fractais, ou seja, a análise fractal pode ser mais uma ferramenta para o estudo da paisagem (RYN e COWAN, 1996).

Tratando especificamente da vegetação, observa-se que ela é muito complexa e está relacionada com os diversos fatores do meio, como climáticos,

edáficos e bióticos. Pode-se quantificá-la por diversos parâmetros, mas, conforme afirma GALVÃO (1989), para analisar as comunidades florestais não existe, ainda, uma metodologia padrão.

Contudo, o sistema baseado nos cálculos de "Abundância", "Frequência" e "Dominância", tem tido boa aceitação e está sendo crescentemente empregado nas pesquisas florestais. Enquanto frequência e densidade indicam números e distribuição, eles não indicam tamanho, volume de espaço ocupado pela floresta, ou quantidade de área coberta pelas árvores. Essas características são valores adicionais desejáveis, que contribuem para o entendimento da importância das espécies (OOSTING, 1956).

Como pode ser visto, a preocupação com a distribuição das espécies/tipologias é bastante antiga. No entanto, devido à complexidade das formas apresentadas por essas tipologias, sua quantificação ou descrição, embora desejáveis, eram muito difíceis.

A análise fractal possibilita a quantificação do grau de fragmentação de um paisagem. O cálculo da dimensão fractal permite diminuir a subjetividade na avaliação de qualquer estrutura (por exemplo, muito ou pouco fragmentada), pois apresenta os resultados em números. Esses resultados também podem ser comparados em qualquer escala espacial ou temporal.

A distribuição das espécies no mundo natural está fragmentada, e o estudo dos processos ecológicos em escalas espaciais e temporais passa a ser vital para o entendimento de como as espécies se interagem. Ver as espécies neste mosaico é importante para o entendimento dos efeitos da escala e também para o manejo da paisagem (HANSSON et al., 1995).

## 2.2 FRACTAIS

### 2.2.1 O que é o Fractal?

Parece estranho que se tenha levado tanto tempo para reconhecer que os conceitos da geometria tradicional não são adequados para medir muitos objetos naturais como as copas das árvores, as encostas de uma montanha ou o contorno de florestas (ZEIDE, 1993).

O conceito de dimensão fractal foi criado entre 1875 e 1925, com os trabalhos de Henry Poincaré, Fatou e Julia. Mas foi só em 1975, com o polonês Benoit Mandelbrot, que se iniciou o estudo da geometria dos fractais. Ele criou a palavra *fractal* a partir do adjetivo latim *fractus*, que significa irregular ou quebrado (BARNESLEY et al., 1988).

Segundo SERRA e KARAS (1997), os fractais são figuras. O conceito de figura é muito amplo e abrange as figuras geométricas familiares como o círculo, o retângulo, a esfera e o cone. Os fractais são figuras com propriedades e características peculiares, que os diferenciam das figuras geométricas habituais. FALCONER (1997) ainda acrescenta que os fractais são figuras muito irregulares para serem descritas por cálculo ou pela geometria tradicional.

Algumas características fundamentais de muitas categorias de fractais são descritas por FALCONER (1997); SERRA e KARAS (1997):

- a) Estrutura fina - vem a ser o grau de detalhamento de um fractal, que não diminui quando se examina uma porção arbitrariamente pequena do mesmo. O fractal possui detalhes em partes tão pequenas como se pode imaginar. Essa característica dos fractais denomina-se estrutura fina. As figuras geométricas convencionais não possuem estrutura fina;
- b) Auto-similaridade ou auto-afinidade - outra característica freqüentemente apresentada pelos fractais é a auto-similaridade. A semelhança assim observada manifesta-se em qualquer nível de construção do fractal, fazendo com que uma parte do fractal se assemelhe a uma parte maior, ou ao fractal inteiro. Essa auto-similaridade pode ser estrita (quando uma porção do fractal reproduz exatamente a forma de uma porção maior) ou estocástica (quando



uma porção do fractal reproduz a forma de uma porção maior, porém, afetada por um fator de redução). A auto-afinidade é um gênero de auto-similaridade mais amplo. Figuras afins podem ser construídas por diversas modalidades de transformações como contrações, dilatações, translações, rotações, reflexões ou por combinações dessas transformações. A semelhança é simplesmente um caso particular de afinidade;

- c) Simplicidade da lei de formação - o alto grau de detalhamento e a complexidade da estrutura de um fractal não impedem, em geral, que eles sejam formados por processos relativamente simples e diretos. O processo de construção é freqüentemente iterativo.

Uma definição menos formal, porém mais acessível, é dada por PALMER (1988). Segundo o autor, fractal é um objeto que tem detalhes em todas as escalas espaciais. Por exemplo, um círculo não é um fractal, porque ampliando-se uma pequena parte desse círculo, ele não apresentará nenhum detalhe, isto é, se restringirá a uma reta. Já o contorno de uma nuvem é um fractal, porque ela apresenta irregularidades em todas as escalas, isto é, mesmo com repetidas ampliações ela ainda apresentará irregularidades.

Conforme BARNSELY et al. (1988), costuma-se pensar que os objetos naturais têm uma certa forma e que esta forma é determinada por uma certa escala característica. Como, por exemplo, um círculo, um quadrado ou uma figura geométrica qualquer. Quando se amplia o objeto, nenhum detalhe é revelado. Para medir corretamente um objeto, como o seu comprimento, área ou volume, mede-se numa determinada escala e pode-se converter para qualquer outra escala. Essa idéia simples é baseada na geometria Euclidiana.

No entanto, MANDELBROT (1983) mostrou ao mundo que muitos objetos não apresentam essa forma simplificada. Muitas estruturas no espaço têm diferentes formas. Essas estruturas não podem ser caracterizadas por uma única escala espacial, isto é, a forma depende da escala com que se analisa o objeto. Por exemplo, a copa de uma árvore numa determinada escala pode parecer um cone. No entanto, conforme amplia-se esse objeto, novos detalhes são

continuamente revelados e, quando se mede o seu comprimento, área ou volume, o valor encontrado depende do detalhamento da medição.

A geometria fractal mostra que os comprimentos ou as áreas de muitos objetos naturais aumentam quando medidos com unidades muito pequenas que permitem revelar mais detalhes desse objeto. Dependendo do tamanho da unidade de medida utilizada, o comprimento de uma costa, por exemplo, pode ser 100, 500 ou 1.000 km. Isto é, não há sentido falar sobre o comprimento ou área de objetos naturais sem especificar o tamanho da unidade utilizada na medição (ZEIDE, 1993).

Para esses tipos de objetos ou processos com propriedades de múltiplas escalas, MANDELBROT (1983) escolheu a palavra fractal. E, conforme ele mesmo cita, nuvens não são esferas, montanhas não são cones, as linhas costeiras não são círculos e a casca da árvore não é lisa. Então, em adição à geometria Euclidiana existe uma outra geometria, fractal, que parece ser bem mais próxima da natureza.

Conforme SERRA e KARAS (1997), ainda não se escoaram duas décadas desde o seu surgimento, e os fractais já proliferaram em uma imensa variedade de tipos, gerados por processos os mais distintos e regidos por princípios matemáticos bastante diversificados, guardando, porém, algumas características peculiares que os distinguem das figuras geométricas convencionais.

Segundo FALCONER (1997), a geometria fractal tem atraído os mais variados setores e o assunto tem crescido em duas frentes: de um lado muitos "fractais reais" de ciência e natureza têm sido identificados. E, de outro lado, a matemática para o estudo dos fractais, que tem se desenvolvido enormemente, apresentando novas ferramentas que surgem para a análise fractal, por exemplo a análise multifractal.

Para SERRA e KARAS (1997), vários estudos vêm mostrando a possibilidade da sua aplicação em diversos campos. O trabalho com fractais é hoje um símbolo sofisticado da ciência do caos, cujo objetivo é detectar padrões nas coisas desprovidas de ordem aparente.

GOODCHILD e MARK (1987), concluem que os fractais devem ser considerados como uma mudança significativa na maneira convencional de pensar sobre as formas espaciais .

Para BUNDE e HAVLIN (1991), a geometria fractal é uma linguagem matemática usada para descrever formas complexas e de natureza interativa.

Segundo BASSINGTHWAIGHTE (1994), fractal e caos são idéias matemáticas e, a grande virtude da introdução do conceito de fractal, é a mudança na maneira de pensar. Por exemplo, sabe-se que nem tudo que parece ser aleatório é realmente aleatório. Existem sistemas determinísticos onde as flutuações dos valores das variáveis são tão complexas que aparentam ser aleatórios. Esta propriedade é chamada de caos. O estudo destes tipos de relações é baseado em sistemas dinâmicos e também são utilizadas muitas propriedades e idéias dos fractais.

O perigo dessas novas investidas, segundo Henry Lebesgue, citado por MANDELBROT (1991), são "certas novidades que não servem para mais nada do que para serem definidas". Contudo, no caso dos fractais, a maioria dos estudos tem sido positiva e contribui para o desenvolvimento de algo fundamental. Isto pode ser confirmado pela quantidade de artigos publicados por pesquisadores de diversos países, aplicando os fractais em vários campos da pesquisa.

BASSINGTHWAIGHTE (1994) cita vários títulos envolvendo fractais: "The Fractal Approach to Heterogeneous Chemistry" (1989), editado por AVNIR, apresenta aplicações para problemas químicos; "Measure, Topology and Fractal Geometry" (1990), de EDGAR, envolve sofisticados modelos matemáticos; "The Beauty of Fractals" (1986), de PEITGEN e RICHTER, inclui a física do magnetismo; "Fractal Physiology and Chaos in Medicine" (1990), onde WEST mostra a matemática usada nas aplicações biomédicas; "Annals of Biomedical Engineering" (1989), editado por McNAMEE, é uma coleção de artigos sobre a aplicação dos fractais nos sistemas biológicos; além do próprio "Fractal Physiology" (1994), de BASSINGTHWAIGHTE, que envolve a aplicação dos fractais nos sistemas fisiológicos em geral, por exemplo, como o fractal tem sido

utilizado para melhor entender o sistema de excitação dos nervos e músculos, ou como os fractais podem esclarecer o fluxo e distribuição do sangue no coração, ou ainda como entender o mecanismo responsável pelo crescimento de órgãos e o sistema vascular.

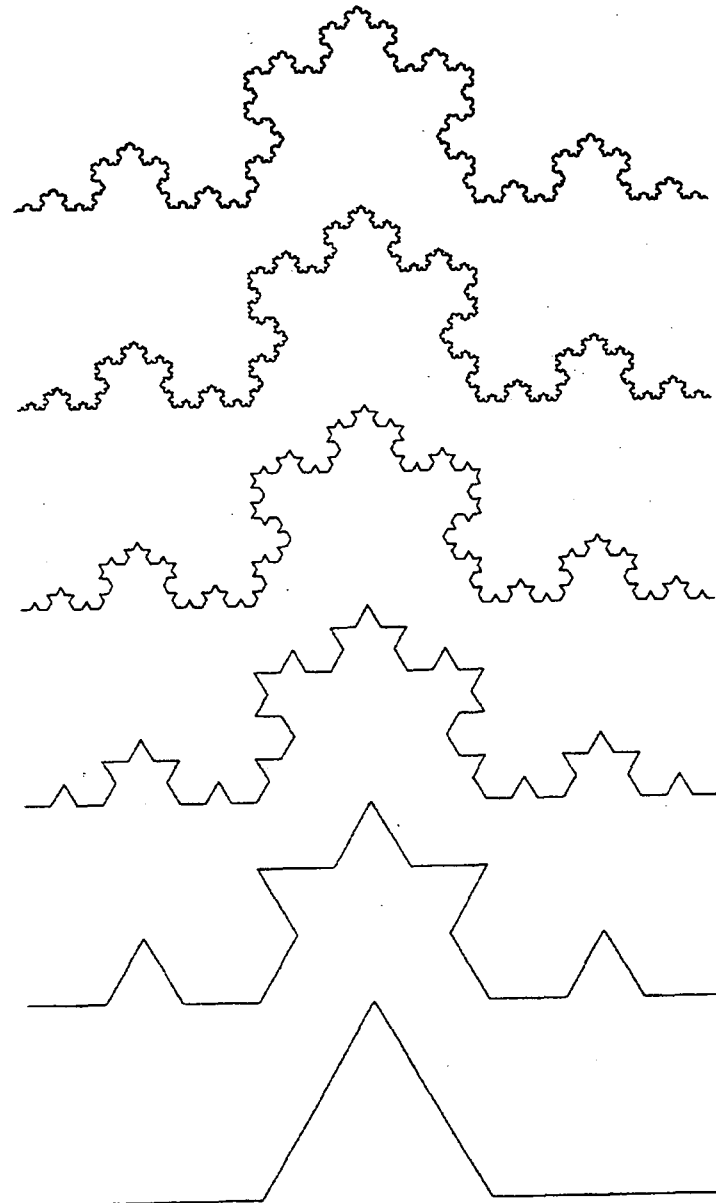
Segundo BUNDE e HAVLIN (1991), os fractais podem ser encontrados em qualquer escala, seja na composição de uma paisagem, na rugosidade de uma superfície ou mesmo em nível de moléculas. O campo dos fractais está se desenvolvendo muito rapidamente.

### 2.2.2 Dimensão Fractal

De acordo com SERRA e KARAS (1997), as figuras convencionais têm dimensão topológica bem determinada. As linhas são figuras unidimensionais, isto é, têm dimensão 1. As superfícies são bidimensionais, ou seja, possuem dimensão 2, enquanto os sólidos são figuras de dimensão 3, ou tridimensionais. A geometria vai mais além e estabelece um tratamento consistente para figuras com dimensão maior, embora não se possa visualizá-las concretamente. Uma característica importante dessas dimensões é que elas não dependem da forma nem do tamanho da figura: uma linha é unidimensional, seja ela reta ou curva; uma superfície é bidimensional, seja ela plana, esférica ou de qualquer outra forma, e qualquer que seja a sua extensão. A dimensão de uma figura assim caracterizada é uma dimensão topológica, que se exprime sempre como um número inteiro.

SERRA e KARAS (1997) ainda enfatizam que os fractais também possuem dimensão topológica. A curva de Koch (FIGURA 1), por exemplo, tem a dimensão topológica de uma curva qualquer, ou seja, dimensão 1. Há, todavia, um conceito de dimensão espacial que é muito importante considerar, e que se relaciona com o espaço que a figura ocupa.

FIGURA 1- PRINCÍPIO DA FORMAÇÃO DE UM FRACTAL MOSTRADO PELA CURVA DE KOCH



(FONTE: MANDELBROT, 1983)

Na verdade, a FIGURA 1 mostra apenas alguns níveis da curva de Koch, porque graficamente já não é mais possível descrever os detalhes, mas o processo pode seguir infinitamente. Esse processo de interação se repete obedecendo sempre a mesma proporção, ou seja, cada pedaço ( $1/3$ ) da curva é dividido e acrescido de dois segmentos de mesmo tamanho ( $1/3$ ). Como resultado

temos a estrutura-fina (em qualquer porção iremos encontrar detalhes), a auto-similaridade (qualquer ampliação de uma pequena porção da curva representa exatamente o estágio anterior) e a simplicidade da lei de formação (o processo de formação é iterativo). A curva de Koch, devido ao detalhamento que apresenta em escalas arbitrariamente pequenas, ocupa mais espaço que uma curva convencional, não dotada de estrutura fina, tendo, portanto, uma dimensão maior que a unidade, mas não chega a ocupar tanto espaço quanto a faixa do plano que a contém, possuindo, conseqüentemente, uma dimensão menor que 2. Dimensão maior que 1 e menor que 2 é uma dimensão fracionária. As dimensões fracionárias são usualmente denominadas dimensões fractais (SERRA e KARAS, 1997).

Para BATTY (1985), esse exemplo da curva de Koch ilustra claramente o conceito de dimensão fractal.

Segundo GOODCHILD e MARK (1987); DeJONG e BURROUGH (1995), uma das características de todo o objeto fractal é a sua dimensão fractal, que é representada por "D". Esta é uma medida do grau de irregularidade e de fragmentação. Os objetos naturais têm em comum uma forma extremamente irregular ou interrompida. Assim, é conveniente dizer que, certas curvas planas muito irregulares apresentam a sua dimensão fractal entre 1 e 2; em certas superfícies muito enrugadas e cheias de ondulações, a sua dimensão fractal está entre 2 e 3.

Para caracterizar essas figuras, pode-se dizer, de modo grosseiro, que uma figura cuja dimensão esteja entre 1 e 2 deverá ser mais afilada que uma superfície, sendo contudo, mais maciça que uma linha. Por exemplo, uma curva fractal, deverá ter uma superfície nula, mas um comprimento infinito. Da mesma maneira, se a sua dimensão estiver compreendida entre 2 e 3, deverá ter um volume nulo e uma superfície infinita. Ou seja, uma curva que não se estende indefinidamente, mas onde a distância entre dois pontos quaisquer é infinita (MANDELBROT, 1991).

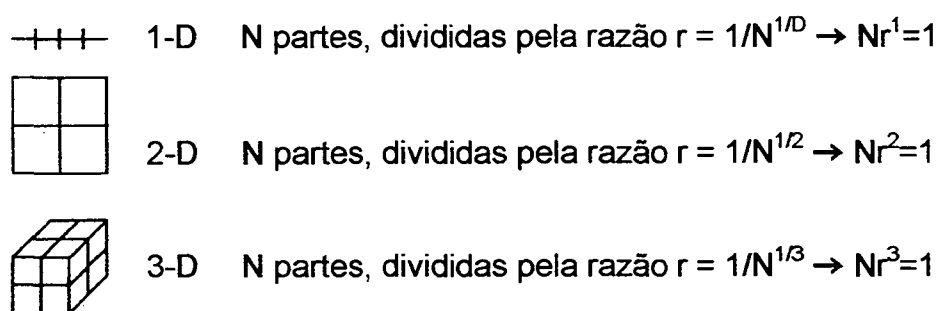
### 2.2.3 Cálculo da Dimensão Fractal

Para a determinação da dimensão fractal "D" não há uma metodologia padrão. Existem vários trabalhos de diversos autores, utilizando diferentes métodos para a obtenção da dimensão fractal "D". Entre eles pode-se citar os métodos variograma ou semi-variograma (PALMER, 1988; DeJONG e BURROUGH, 1995); contagem de boxes ou curvas de isovalor (LAM, 1990; PALMA, 1999; EMERSON et al., 1999); prisma triangular (DeJONG e BURROUGH, 1995; QIU et al., 1999); movimento Browniano (GOODCHILD et al., 1987; POLIDORI, 1991; LEVITT et al., 1997); relação perímetro/área (DeCOLA, 1989; LaGRO, 1991; ZEIDE, 1993; BATISTELLA e SOARES, 1999; PUZACHENKO, 2000); e alguns desses modelos modificados (OLSEN et al., 1993; PACHEPSCKY, 1998). Contudo, qualquer que seja o método para definir a dimensão fractal "D", eles são baseados no conceito de auto-similaridade dos fractais. Segundo VERDYUSHKIN (1994), matematicamente esses métodos são equivalentes.

MANDELBROT (1983) define a dimensão fractal "D" em termos de número de partes do objeto gerado (N), e a razão de similaridade (1/r).

O princípio do cálculo da dimensão fractal pode ser visto na figura a seguir (FIGURA 2), onde foram utilizadas figuras geométricas convencionais, com dimensões inteiras e auto-similaridade estrita.

FIGURA 2 - PRINCÍPIO DO CÁLCULO DA DIMENSÃO FRACTAL "D"



(FONTE: BARNSLEY et al., 1988)

Generalizando, para um objeto de  $N$  partes, cada divisão pela razão  $r$  será:

$$N r^D = 1$$

Isto define a dimensão fractal  $D$ :  $D = \frac{\ln N}{\ln r}$

onde:

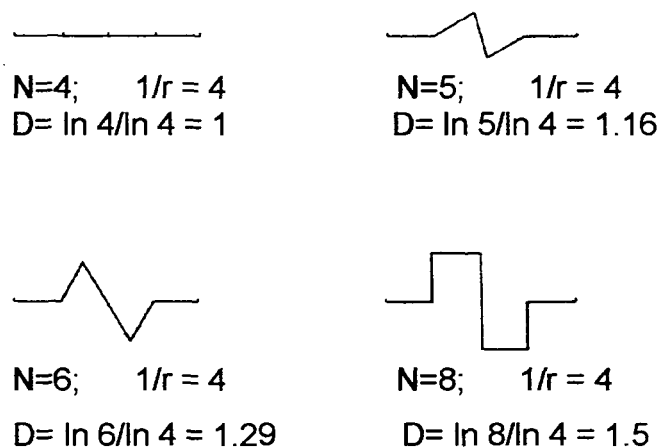
$N$  = número de partes

$r$  = razão

$D$  = dimensão fractal

A FIGURA 3 a seguir mostra alguns exemplos numéricos do cálculo de dimensão fractal "D". Observa-se que a primeira reta ( $N = 4$ ), é formada por 4 segmentos de comprimento correspondente a  $1/4$  do comprimento total da reta, logo,  $r = 1/4$ , ou seja,  $1/r = 4$ . As demais retas ( $N = 5$ ;  $N = 6$  e  $N = 8$ ) são formadas por 5, 6 e 8 segmentos respectivamente. Todos os segmentos têm o mesmo comprimento em qualquer uma das retas, ou seja, o comprimento de cada segmento corresponde a  $1/4$  do comprimento total da reta.

FIGURA 3 - EXEMPLOS DE CÁLCULO DA DIMENSÃO FRACTAL "D"



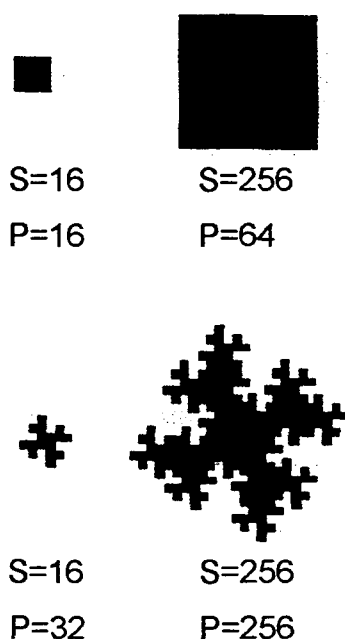
(FONTE: LAM, 1990)



Mas, para o cálculo da dimensão fractal em figuras ou regiões, utilizam-se as medidas em termos de perímetro e área. Turner e Ruscher (1988) e Mandelnoff et al. (1993) citados por GAINES (1999) encontraram que a dimensão fractal dada pela relação área-perímetro foi um bom indicador para a análise de uma paisagem.

Na FIGURA 4, pode-se observar a relação existente para os quadrados (perímetros lisos).

FIGURA 4 - COMPARAÇÃO ENTRE REGIÕES (ÁREA E PERÍMETRO)



(FONTE: DeCOLA, 1989)

Para os quadrados temos:  $\text{PERÍMETRO} \propto \sqrt{\text{área}}^1$ ; ou

$\text{PERÍMETRO} = 4 \sqrt{\text{área}}^1$ ; neste caso, a dimensão  $D = 1$ .

Considerando a figura do mosaico tem-se:

$\text{PERÍMETRO} \propto \sqrt{\text{área}}^{3/2}$ ; ou

$\text{PERÍMETRO} = 4 \sqrt{\text{área}}^{3/2}$

Generalizando, tem-se:

$p = c \sqrt{s}$  ; no caso do quadrado, onde  $D=1$ ; e

$p = c \sqrt{s^D}$  ; no caso do fractal, onde  $1 \leq D \leq 2$  (1)

onde:

$p$  = perímetro

$c$  = coeficiente de forma

$s$  = área

$D$  = dimensão fractal

linearizando (1) tem-se:  $\ln p_j = \ln c + D/2 \ln s_j$  (2)

que é uma equação do tipo:  $y = a + bx$

onde:  $y = \ln p_j$

$a = \ln c$

$x = \ln s_j$

$b = D/2$ ; ou seja, dimensão fractal  $D = 2b$

#### 2.2.4 Análise de Pareto

O cálculo da dimensão fractal "D" permite fazer uma análise em termos de formas dos fragmentos gerados pela classificação. A análise de Pareto permite analisar uma outra característica dos fractais que é o fenômeno da escala, ou auto-similaridade; ou seja, a tendência de que os fractais não tenham uma característica ou tamanho típicos. Este fenômeno da escala permite descrever o tamanho da distribuição dos fragmentos (DeCOLA, 1989).

Esta análise é feita a partir de uma relação entre a área e o seu grau ou *ranking* (r). Inicialmente separam-se todas os fragmentos ou áreas de uma mesma classe. O grau de cada fragmento será determinado pela comparação de cada fragmento com os demais; ou seja, o número de fragmentos maiores que o fragmento analisado, acrescido de mais uma unidade. Isto resulta numa relação hiperbólica com a função:

$$S_j = Ar_j^{-b} \quad (3)$$

onde:

$S$  = área do fragmento  $j$

$A$ ;  $b$  = coeficientes

$r$  = *ranking* ou grau do fragmento  $j$

linearizando (3) tem-se:  $\ln s_j = \ln A - b \ln r_j$  (4)

que é uma equação do tipo:  $y = a + bx$

onde:

$y = \ln s_j$

$b = b$

$x = \ln r_j$

$a = \ln A$  = parâmetro de Pareto "a"

## 2.2.5 Aplicações dos Fractais no Estudo da Vegetação

Afinal, qual a relação existente entre a vegetação e os Fractais? Como uma análise fractal pode contribuir para o estudo de uma paisagem?

A geometria fractal tem se tornado uma importante ferramenta para análises de dados da paisagem. Por exemplo, os modelos fractais podem descrever a rugosidade de uma superfície, mostrando a similaridade de algumas características que persistem em várias escalas espaciais (PACHEPSCKY e RITCHIE, 1998).

O'Neill et al. (1988) e Turner (1990), citados por GAINES et al. (1999), propuseram a dimensão fractal como um índice de medida para definição dos padrões da paisagem.

PALMER (1988) explica que a vegetação é um exemplo típico de fractal, porque ela apresenta detalhes em todas as escalas espaciais de interesse. Numa escala grande, os padrões são definidos pelo espaçamento e interações individuais das plantas. Numa escala menor, a vegetação pode

consistir de arranjos, que estão integrados com a paisagem. Numa escala menor ainda, os padrões de vegetação são influenciados por características geomorfológicas como vales, encostas, picos e corpos d'água.

Segundo GAINES et al. (1999), a dimensão fractal descreve a forma do fragmento e a complexidade do contorno de uma paisagem.

A paisagem ou o mosaico de vegetação é composta por uma mistura de formas e padrões. Muitas questões de interesse na área florestal (como o estudo da diversidade e a distribuição das espécies) envolvem tais padrões. Ainda, uma característica marcante da vegetação é sua natureza dinâmica: são as mudanças na distribuição e estrutura de componentes da vegetação que ocorrem no tempo (CHAPMAN, 1976).

Segundo LaGRO (1991), a estrutura de uma paisagem é definida por seus parâmetros espaciais, os quais incluem a forma, o tamanho, o número e a distribuição de cada tipologia. E conforme LAM (1990), no uso prático dos fractais também incluem-se as análises de padrões, formas e estruturas.

Alguns autores têm questionado a acurácia dos fractais como índices de padrões da paisagem (Cale e Hobbs, 1994; Groom e Schumaker, 1996; Schumaker, 1996, citados por GAINES et al., 1999). Mas, ainda segundo GAINES et al. (1999), acima de tudo, deve-se ter muita atenção para as diferenças de escalas e dimensões dos mapas quando se compara índices de padrões entre paisagens de diferentes locais. Por exemplo, Turner (1989, 1990), Lehmkuhl e Raphael (1993), citados por GAINES et al., (1999), encontraram que muitos índices de padrões diferem, simplesmente, porque as dimensões dos mapas são diferentes.

De acordo com PUZACHENKO (2000), a dimensão fractal pode ser considerada como uma medida de textura da imagem. Ainda segundo o autor, diferenças nas dimensões fractais estão relacionadas com diferentes origens de estruturas.

Uma das formas para o acompanhamento do estudo de uma floresta pode ser feito através de imagens de satélite. O conteúdo de uma imagem baseia-se tanto na intensidade de cada pixel, como no seu arranjo espacial.

Contudo, a maioria das técnicas de classificação disponíveis baseiam-se apenas nos valores de intensidade espectral. DeCOLA (1989), admitiu que pouco uso é feito das informações espaciais, e que isto se deve à própria complexidade das imagens. Isto faz com que as técnicas padrão de classificação analisem apenas as características espectrais.

Conforme demonstrado pelas citações bibliográficas, os fractais podem ser uma alternativa para a análise dessa complexidade das formas, pois entre as aplicações práticas dos fractais, está o reconhecimento de padrões que não se enquadram em modelos da geometria convencional, como o contorno de uma floresta, ou as formas da natureza em geral.

Ainda com respeito às imagens de satélite, LILLESAND e KIEFER (1987) lembram que a chave para uma boa classificação está na escolha das amostras de treinamento. Contudo, alguns tipos diferentes de cobertura podem apresentar respostas espectrais similares que são inerentes à imagem. Mesmo com mais amostragens, estes alvos não poderão ser espectralmente separados. Neste caso, métodos alternativos incluindo interpretação visual e checagem de campo, devem ser usados para discriminar estes tipos de cobertura. Outros procedimentos para reconhecimento de padrões espaciais também poderiam ser aplicados nestes casos. E uma das ferramentas para o reconhecimento destes padrões pode ser a análise fractal.

PALMER (1988) usou as relações entre geoestatísticas e fractais para demonstrar que estes métodos podem ser úteis para descrever a variação existente na vegetação. A sua área de estudo envolveu seis tipos de comunidades de plantas existentes na Carolina do Norte. Segundo o autor, os resultados mostraram que a dimensão fractal pode ser determinada a partir do método semivariograma. Outro resultado foi a observação da existência de escalas espaciais em que a vegetação pode ser considerada homogênea. Isto tem importante implicação na teoria ecológica e nos métodos de amostragem da vegetação.

Utilizando outra metodologia para a análise fractal, DeCOLA (1989) demonstrou a aplicabilidade dos fractais na análise espacial de uma imagem do

Landsat TM da região noroeste de Vermont. Ele trabalhou com a relação área-perímetro; segmentação de imagem e análise de Pareto e definiu oito classes de cobertura. Os resultados mostraram que os índices calculados podem ser de valor descritivo na análise digital de imagens de satélite.

Utilizando-se da mesma metodologia através da relação área-perímetro, Lehmkuhl et al. (1991), citados por GAINES (1999), mostraram que a complexidade da bordadura de uma paisagem medida pela dimensão fractal área-perímetro pode ser associada com a ocorrência de vertebrados no oeste de Washington e Oregon. Em outro estudo, os mesmos autores encontraram ainda que o índice fractal está pouco correlacionado com os distúrbios da exploração ou áreas de corte raso.

Ainda seguindo a mesma linha de cálculo através da relação área-perímetro, OLSEN et al. (1993) apresentou uma metodologia para refinar o cálculo da dimensão fractal "D" em imagens classificadas do Landsat TM. O método sugere uma modificação no cálculo do perímetro através da inclusão de um fator denominado redução de perímetro "Q". Utilizando-se deste perímetro modificado, calculou a dimensão fractal modificada "Dm". Os resultados mostraram que a dimensão fractal modificada combina o número de fragmentos, suas distribuições e formas. O autor concluiu que o índice de dimensão fractal modificado "Dm" pode proporcionar uma medida simples de diversidade da paisagem.

A análise fractal também foi aplicada num estudo multitemporal de uma paisagem (EMERSON et al., 1999). A partir de uma imagem Landsat TM estudaram uma região do Alabama, analisando as dimensões fractais encontradas para área urbana, agricultura e floresta. Os testes foram feitos para diversos tamanhos de pixel e em diferentes épocas do ano. Os resultados mostraram que existe uma complexa relação entre as duas variáveis (tamanho do pixel e época do ano) e a dimensão fractal calculada.

Um estudo tentando relacionar a imagem de satélite com um Modelo Digital de Terreno - DTM, utilizando-se da análise fractal foi feito por LAM (1990). Através de imagens do Landsat TM, o autor estudou o comportamento de três

diferentes tipos de superfícies da costa da Louisiana. Calculou a dimensão fractal dessas superfícies nas várias bandas e comparou com as dimensões obtidas de um DTM. Este estudo mostrou que diferentes tipos de cobertura têm diferentes níveis de dimensão fractal nas diferentes bandas. Comparados com os resultados obtidos a partir do DTM, as dimensões fractais obtidos do Landsat foram maiores nas três áreas estudadas.

Um outro estudo comparativo, tentando relacionar imagem de satélite com imagens do sensor GER - Geophysical Environmental Research Imaging Spectrometer através da análise fractal foi feito por DeJONG e BURROUGH (1995). Eles testaram dois métodos de análise fractal para separar as várias unidades tipológicas da paisagem do Mediterrâneo a partir de uma imagem do Landsat TM do sul da França, e fizeram uma comparação com as imagens obtidas a partir do sensor GER. Os resultados obtidos a partir do GER não foram satisfatórios, segundo os autores, talvez pela baixa qualidade da imagem. Com relação ao Landsat TM, os dois métodos mostraram que a dimensão fractal pode ser utilizada na classificação tipológica; embora sejam necessários muitos dados para a análise e algum cuidado na hora da interpretação.

A análise fractal também foi aplicada em imagens hiperespectrais por QIU et al. (1999). Os autores computaram a dimensão fractal para 224 bandas de duas cenas hyperspectral images AVIRIS da região de Los Angeles para o estudo do comportamento das áreas urbana e rural. Os autores mostraram que a dimensão fractal varia dentro do espectro formado pelas 224 bandas. A maior diferença na dimensão fractal das duas áreas ocorreu nas bandas do visível. Outro resultado deste estudo é a alternativa de se usar curvas de dimensão fractal quando se trabalha com imagens hiperespectrais.

PALMA (1998) apresentou uma metodologia para o cálculo da dimensão fractal para fotografias aéreas métricas coloridas, na escala 1:18.000, baseado no algoritmo "box counting". Ele utilizou a dimensão fractal para comparar três áreas de *Pinus sylvestris* com diferentes densidades. Os resultados mostraram que a dimensão fractal ficou bem caracterizada apenas para a área de

reflorestamento. Já as duas outras densidades não foram bem diferenciadas pela dimensão fractal.

As fotografias aéreas também foram utilizadas para a análise fractal por LaGRO (1991). Ele usou fotografias aéreas de duas épocas diferentes para estudar a distribuição das áreas que compõem uma floresta no Estado de Nova Iorque. Como índices de comparação, o autor utilizou os fractais e também o índice de contiguidade. Os resultados mostraram que a dimensão fractal e o índice de contiguidade foram importantes para poder explicar o desenvolvimento da floresta naquele período.

Outro trabalho que utilizou fotografias aéreas para a análise fractal foi dos russos PUZACHENKO et al. (2000). Os autores fizeram um estudo para analisar a estrutura de uma paisagem da Rússia Central através de fotografias aéreas (escala 1:35.000), que escanizadas resultaram numa imagem com pixel de 10 m. Para a análise eles identificaram cada estrutura da paisagem como dimensões fractais.

Considerando trabalhos desenvolvidos no Brasil, apenas uma citação (BATISTELLA e SOARES, 1999) foi encontrada. Os autores utilizaram vários índices para comparar a fragmentação da paisagem em dois modelos de assentamento rural em Rondônia. Um desses índices utilizados foi a dimensão fractal "D" calculada a partir da relação área-perímetro. Eles utilizaram o índice de dimensão fractal para avaliar a complexidade da geometria das manchas dos elementos da paisagem. Por conseguinte, mudanças na forma da mancha de uma paisagem deveriam ser refletidas por mudanças na dimensão fractal.



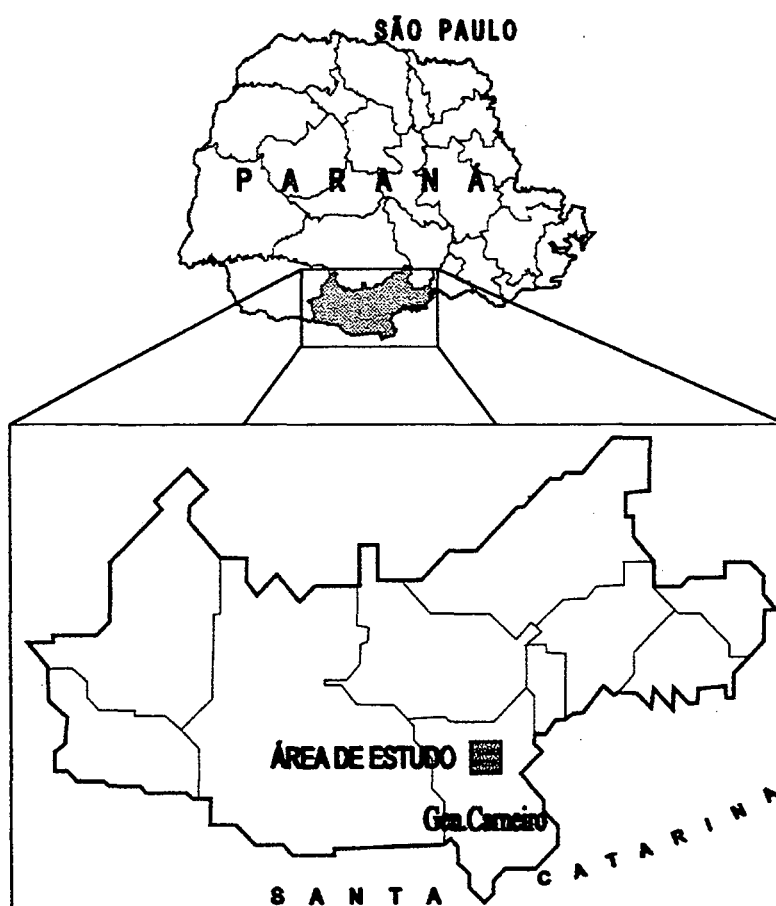
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na Região Centro Sul do Paraná, no município de General Carneiro, a 280 km de Curitiba, de propriedade das Indústrias Pedro N. Pizzatto Ltda (FIGURA 5).

As fazendas estão localizadas na área de ocorrência da Floresta Ombrófila Mista, atendendo ao objetivo proposto por este estudo.

FIGURA 5 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO



FONTE: SPVS (1996)

O volume de dados existentes, como o Relatório do Inventário Contínuo em Floresta Natural (SANQUETTA, 1998) e outros (ver item 3.2.2), assim como disponibilidade da imagem de satélite, também contribuíram na escolha da área.

A área, que engloba as Fazendas São Pedro I, São Pedro II e Santa Cândida, estende-se entre as coordenadas 26°20'35" e 26°26'13" Lat. S., e 51°19'49" e 51°25'29" Long. W.

De acordo com PIZZATTO (1998), a área de floresta juntamente com as áreas de Reserva Legal submetidas a Planos de Manejo Florestal são de 2.719 ha, o que representa 64,57% da área total das propriedades. As áreas de Preservação Permanente representam 72 ha, equivalente a 1,71% das áreas. Os povoamentos, na maioria *Pinus* sp., representam uma área de 1.287 ha, correspondentes a 30,56% do total das áreas. Os restantes 133 ha, ou seja 3,16% da área total são representados por outras áreas como estradas, cursos d'água, edificações, etc. A TABELA 1 mostra a distribuição das áreas nas respectivas fazendas.

**TABELA 1 - DISTRIBUIÇÃO DAS ÁREAS DAS FAZENDAS EM HECTARES, SEGUNDO A UTILIZAÇÃO**

Fazenda	Área Total do Imóvel	Floresta Manejada	Preservação Permanente	Reserva Legal Manejada	Reflorestamentos	Área Inaproveitada / Infra-estrutura
Sta. Cândida	2033	887	32	407	687	20
São Pedro II	968	451	16	194	300	7
São Pedro I	1210	538	24	242	300	106
TOTAL (ha)	4211	1876	72	843	1287	133
%	100	44,55	1,71	20,02	30,56	3,16

FONTE: PIZZATTO (1998)

A atual paisagem da área de estudo é o resultado das atividades florestais que se iniciaram na década de 30. Nesse período, as técnicas florestais modernas eram desconhecidas na empresa, mas a determinação de se operar apenas com áreas próximas à indústria permitiu, de certa forma, a manutenção das florestas da região.

Segundo esses relatórios, atualmente os Planos de Manejo Florestal que vêm sendo executados pela empresa visam o manejo para o rendimento sustentado e atendem aos seguintes princípios:

- a) manejo ambiental: procedimento ambiental que visa obtenção da maior rentabilidade dos recursos naturais com a menor intervenção possível no ambiente;
- b) manejo florestal sustentável: administração da floresta para obtenção de benefícios econômicos e sociais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema.

Assim sendo, para a política da empresa foi fundamental que o manejo florestal fosse praticado de modo a proporcionar a produção de matéria-prima florestal de forma contínua, equilibrada e em perpetuidade, gerando benefícios econômicos ao empreendimento, emprego e renda à comunidade da região, tendo como premissa o respeito e conservação da natureza.

Dentro dessa visão conservacionista, a empresa adotou baixa intensidade de corte, para permitir a recuperação da floresta, principalmente em áreas que tiveram maior intensidade de corte em épocas anteriores. Como resultado, o volume de madeira efetivamente cortado entre 1991 e 1997 foi 8,52% do volume total autorizado pelo IBAMA. As espécies mais exploradas no período foram o pinheiro (*Araucaria angustifolia*), imbuia (*Ocotea porosa*) e canela (*Nectandra* sp.).

O volume total cortado em sete anos (1991 à 1997) foi de 22.455 m<sup>3</sup> para uma área de 4.603 ha de floresta sob manejo em regime de rendimento sustentado. Isto resultou numa média de 7,37 m<sup>3</sup>/ha, ou ainda, 1,05 m<sup>3</sup>/ha/ano de madeira extraída.

Para suprir a necessidade de madeira para a indústria, a empresa adotou a prática de reflorestamentos, o que permitiu diminuir os cortes mais intensivos nas áreas de manejo de espécies nativas. Para o ajuste entre a demanda industrial com a disponibilidade florestal a empresa visa expandir os povoamentos em áreas vizinhas degradadas.

Os reflorestamentos efetuados pela empresa foram planejados e executados de tal forma a minimizar os impactos ao meio ambiente, à paisagem e à biodiversidade. Os plantios foram realizados com uma técnica de dispersão dos talhões, mantendo-se faixas com espécies nativas formando os corredores ecológicos, na forma de Reserva Legal, Preservação Permanente ou mesmo com florestas manejadas.

Como Preservação Permanente foram considerados todos os cursos d'água e áreas íngremes devidamente protegidos por vegetação, conforme manda a legislação vigente. Nas áreas de Preservação Permanente nenhum tipo de intervenção direta é praticada. Estas áreas têm sido reservadas exclusivamente à proteção ambiental.

A empresa tem mantido as áreas de Reserva Legal conforme previsto na legislação. A forma de manejo praticada nestas áreas consiste em cortes leves e seletivos de árvores senis. O corte seletivo, ajardinado, praticado nas áreas de Reserva Legal, permite uma transição harmônica entre as áreas de manejo convencional (corte mais intensivo) e as áreas de Preservação Permanente (sem intervenção).

A manutenção de fragmentos de Reserva Legal em áreas contínuas às áreas de Preservação Permanente tem sido uma técnica aplicada pela empresa. Esta condição permite a existência de corredores ecológicos favoráveis à fauna local, refletindo inclusive em melhores possibilidades de regeneração natural das espécies florestais, resultando numa interação fauna/flora.

As áreas de manejo estão submetidas ao corte seletivo permanente de árvores maduras, oprimidas, estagnadas e/ou com problemas fitos-sanitários.

Além do manejo florestal para fins de produção de madeira para abastecimento da indústria, a empresa também efetua colheita de folhas de erva-mate (*Ilex paraguariensis*), com um programa de ciclo de corte a cada três anos, permitindo uma rotação adequada para colheitas anuais.

Ainda, de acordo com o mesmo relatório, com base em mosaicos de fotografias aéreas na escala de 1:10.000, foram definidas quatro tipologias florestais:

- a) tipo I: áreas com predominância de araucária no dossel e alto potencial volumétrico desta espécie;
- b) tipo II: áreas mistas de araucária e folhosas, com baixo potencial volumétrico de araucária e considerável potencial volumétrico de folhosas;
- c) tipo III: áreas de campo, com ocorrência de araucária com baixo potencial volumétrico;
- d) tipo IV: áreas mistas de araucária e folhosas, com baixo potencial volumétrico em ambos os grupos.

### 3.1.1 Clima

O clima da região é caracterizado como subtropical úmido mesotérmico (Cfb), com verões frescos pela classificação de Koeppen, e submontano úmido e muito úmido pela classificação ecológica de Holdridge.

A temperatura nos períodos mais frios pode alcançar mínima de -10°C e nos períodos quentes, máximas superiores a 36°C, sendo a média anual de 15°C a 19°C .

### 3.1.2 Solos

Nesta região os solos são desenvolvidos na grande parte em rochas sedimentares e magmáticas. Há presença de solos fracos, ácidos, classificados como litólicos eutróficos e com afloramentos rochosos. Ocorrem, ainda, manchas de solos orgânicos e hidromórficos.

### 3.1.3 Vegetação

De acordo com IBGE (1992), a formação vegetal encontrada nas áreas corresponde ao bioma denominado Floresta Ombrófila Mista ou Floresta com Araucária. É a área de dispersão natural, atual, no sul do Brasil, do pinheiro-do-paraná.

Segundo LEITE (1994), poucas são as formações florestais brasileiras que têm sua fisionomia tão bem caracterizada pela presença de uma espécie vegetal como a Floresta Ombrófila Mista ou Floresta com Araucária. Mesmo com a profunda alteração a que foi submetida a cobertura vegetal do Estado, a presença de remanescentes do pinheiro-do-paraná, mesmo que isolados, atesta sua distribuição e facilita grandemente a definição da área de ocorrência desta formação.

A Região da Floresta Ombrófila Mista, por suas características, assume papel muito importante na dinâmica evolutiva do sul do Brasil. Está em contato com a região da Floresta Ombrófila Densa a leste, com as regiões marcadas pela estacionalidade foliar (subcaducifolia) ao norte e oeste, e com as formações campestres ombrófilas em diferentes altitudes (LEITE, 1994).

Ainda segundo o mesmo autor, a área mais típica e representativa da Floresta Ombrófila Mista é aquela das altitudes superiores aos 800 m. Seu clima é o mais frio da região e com os maiores índices de geadas noturnas. Caracteriza-se pela ausência de período seco e ocorrência de um longo período frio (média  $<15^{\circ}\text{C}$ ). O período quente anual (média  $>20^{\circ}\text{C}$ ) é geralmente curto ou ausente. Dependendo das condições climáticas, dois grupos distintos de comunidades, com araucária e lauráceas podem ser citados:

- a) onde o pinheiro se distribui de forma esparsa por sobre um bosque contínuo, no qual 70 a 90% das árvores pertencem às espécies: imbuia (*Ocotea porosa*), canela-amarela (*Nectandra lanceolata*) e canela-preta (*Nectandra megapotamica*);
- b) outro grupo, onde a araucária forma um estrato superior bastante denso sobre um estrato de 50 a 70% de folhosas: canela-lageana (*Ocotea pulchella*), canela-amarela (*Nectandra lanceolata*), canela-guaicá (*Ocotea puberula*) e canela-fedida (*Nectandra grandiflora*).

Dentre as espécies mais comuns nos povoamentos secundários destacam-se: a bracatinga (*Mimosa scabrella*), a canela-guaicá (*Ocotea puberula*), o vassourão-branco (*Piptocarpha angustifolia*), o angico-branco

(*Anadenanthera colubrina*), o vassourão-preto (*Vernonia discolor*), café-do-mato (*Caesaria sylvestris*), vassouras (*Baccharis* spp.) e samambaias-das-taperas (*Pteridium aquilinum*).

Na área de estudo ocorre uma diversidade maior de condições no que se refere a estrutura da floresta, visto que encontram-se situações distintas de exploração, tipos de solo e microclimas. De modo geral, predominam as araucárias no dossel, com as folhosas em um estrato inferior. Porém, ocorrem áreas onde o domínio é da imbuia (*Ocotea porosa*) ou sapopema (*Sloanea lasiocoma*). Entre as espécies componentes dos estratos inferiores destacam-se as canelas (*Nectandra* spp., *Ocotea* spp.), *Ilex paraguariensis*, *Prunus brasiliensis*, *Lithraea brasiliensis*, *Sapium glandulatum*, *Clethra scabra*, *Jacaranda puberula* e diversas Mirtáceas, entre outras de menor destaque (SANQUETTA, 1998).

No domínio dos solos derivados do embasamento Pré-Cambriano e dos arenitos ou de relevo fortemente ondulado do basalto (geralmente situado acima dos 800 m), predominam pastagens sobre pequenas áreas de policultura. Nestas áreas, os relictos florestais e a vegetação secundária (capoeiras) assumem maior expressão.

Ainda, dentro de sua área de distribuição, ocorrem as áreas de campos limpos (Estepe Gramíneo-lenhosa), e de várzeas aluviais (Áreas de Formação Pioneira com influência fluvial). Uma diferença básica entre as duas é que os campos limpos ocorrem em relevo suave-ondulado e até mais acidentado, enquanto que as várzeas aluviais ocupam exclusivamente áreas de relevo plano (as planícies aluviais), influenciadas pelo regime hídrico dos rios (LEITE, 1994).

## 3.2 MATERIAL

### 3.2.1 Imagem de Satélite

Para o trabalho foi utilizada a imagem de satélite Landsat-5 TM; órbita/ponto 222-78, de 02/12/98. As bandas 1 e 2, por apresentarem muito ruído, assim como a banda 6 (termal) com uma resolução espacial de 120x120 m, não foram utilizadas. Portanto, as bandas selecionadas foram 3, 4, 5 e 7.

Para os cálculos e processamento da imagem foram utilizados os software conforme a TABELA 2.

**TABELA 2 - SOFTWARE UTILIZADO**

Processamento da Imagem	Cálculos de Perímetro e Áreas	Cálculos Estatísticos e Gráficos
ENVI versão 3.2	ArcView versão 3.1	Excel Office 98
ERDAS versão 8.4		Statistica versão 5

### 3.2.2 Dados Complementares Sobre a Área de Estudo

Como dados complementares foi utilizado o Mapa Carta do Brasil (IBGE) na escala de 1:100.000; folha SG-22-Y-B-III (União da Vitória). Também utilizou-se o mosaico de fotografias aéreas coloridas, obtidas em 1992 na escala de 1:10.000, existente na empresa, que envolve toda a área de estudo.

Foram utilizados ainda, três relatórios de trabalhos anteriormente realizados para a empresa, o Relatório de Execução de Planos de Manejo Florestal (PIZZATTO, 1997, 1998) e o Relatório Parcial de Atividades de Pesquisa do Projeto Inventário Contínuo em Floresta Natural (SANQUETTA, 1998).

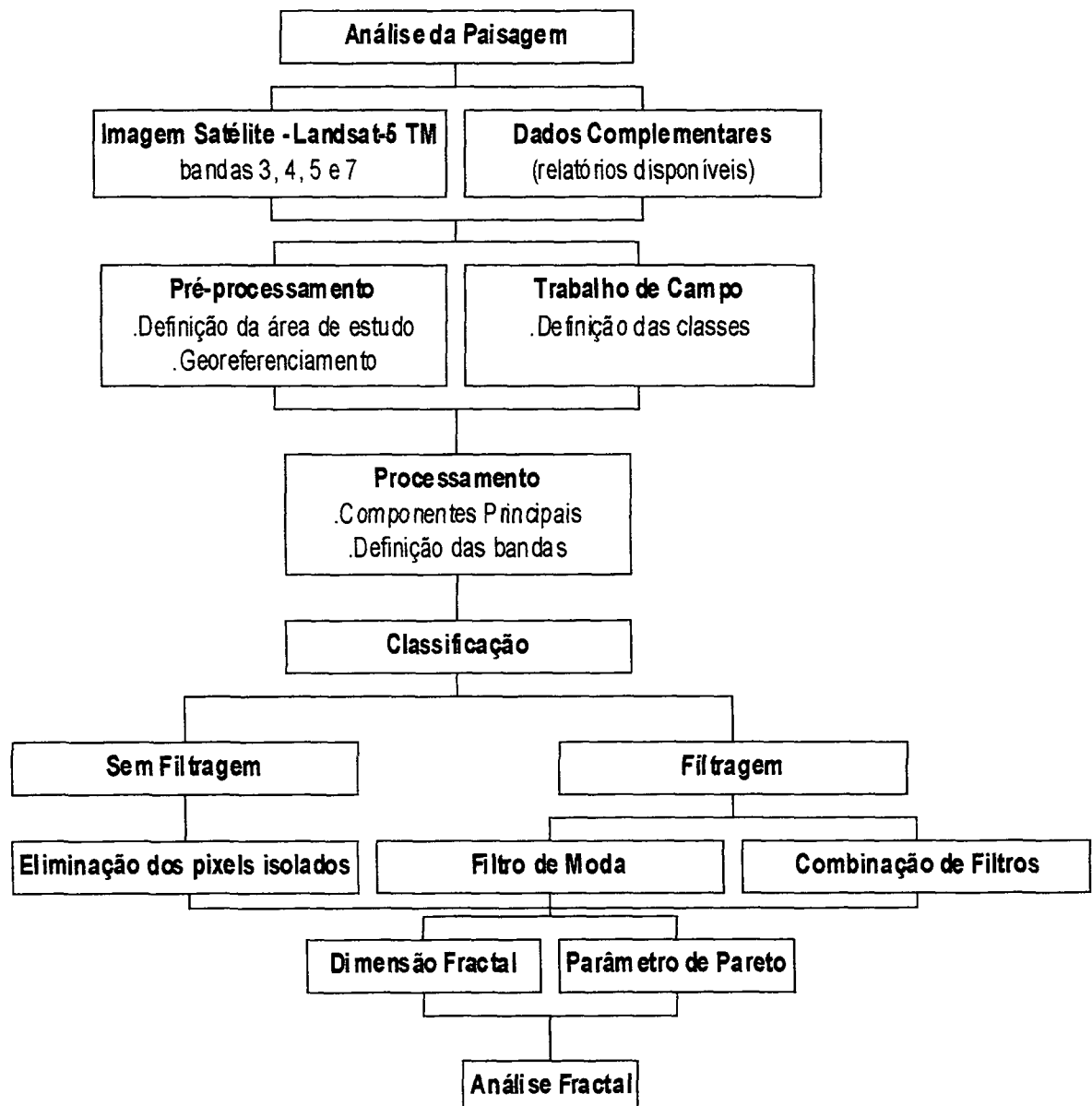
## 3.3 METODOLOGIA

Inicialmente foi feita a classificação supervisionada da imagem de satélite pelo método da Máxima Verossimilhança. A partir desta imagem classificada foi feita a análise fractal, de onde obteve-se a dimensão fractal "D" e o parâmetro de Pareto "a" específicos para cada classe de vegetação. Esses dois novos parâmetros foram, então, analisados quanto às suas possíveis utilizações para estudos da paisagem.



A seqüência das principais etapas desenvolvidas neste trabalho estão sintetizadas na FIGURA 6.

FIGURA 6 - FLUXOGRAMA DAS PRINCIPAIS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS



### 3.3.1 Trabalho de Campo

Antes de iniciar o processamento da imagem propriamente dito, foi feito um reconhecimento prévio da área. Utilizou-se como material de apoio, uma impressão da imagem de satélite (composição colorida com as bandas 5, 4 e 3 em RGB), um mapa na escala de 1:100.000 e um mosaico com fotografias coloridas na escala de 1:10.000, além dos Relatórios de Planos de Manejo Florestal de 1996 e 1997 e do Relatório de Inventário de 1998.

O mapa foi utilizado para uma primeira localização da área de estudo em termos de região, ou seja, quais as vias de acesso, cidades mais próximas, rios e estradas que cortam a fazenda.

Os relatórios existentes forneceram a descrição das classes existentes na fazenda, e com as respectivas fotografias, foi possível saber quais seriam as classes encontradas na área. Isto permitiu uma análise da imagem, antes do reconhecimento em campo, onde foram anotados os pontos de dúvidas ou confusão de classes para serem checados.

As tipologias II e IV definidas no relatório intitulado "Inventário contínuo em floresta natural - implantação de um sistema de monitoramento de crescimento e produção" (ver item 3.1), não puderam ser diferenciadas na imagem de satélite, uma vez que as duas são áreas mistas de araucária e folhosas, diferenciando apenas quanto à presença de espécies com maior valor comercial na tipologia II. Assim sendo, para este trabalho, as duas classes foram agrupadas e passaram a ser denominadas de folhosas com araucária.

O planejamento para o reconhecimento *in loco* das classes existentes foi feito sobre o mosaico de fotografias, onde foi possível a identificação de todas as estradas e aceiros, além de proporcionar uma visão global de toda a área.

O reconhecimento foi feito procurando-se relacionar as diferentes formações vegetais existentes no campo com os alvos observados na imagem. Em alguns casos a umidade do solo foi um fator determinante na definição da classe. Por exemplo, na separação entre algumas áreas de capoeira e banhado.

Devido à diferença entre as datas da imagem de satélite e do trabalho de campo (a imagem é datada de Nov/1998, e o trabalho de campo foi realizado

em Jul/2000), os dados referentes ao histórico de uso da terra (novos plantios, áreas de corte, desbaste, entre outros) foram imprescindíveis para correlacionar as feições definidas na imagem com os padrões observados no campo.

A definição do número de classes para a classificação supervisionada foi feita com base nos relatórios existentes e complementadas com o trabalho de campo. Oito classes foram definidas (uma descrição mais detalhada para as tipologias vegetais pode ser vista no item 3.1.3):

- 1- Água: rios, lagos, tanques, etc;
- 2- Banhado: áreas com solo hidromórfico e com uma cobertura vegetal típica (FIGURA 7);
- 3- Solo exposto: as ruas, os aceiros e as áreas ocupadas por construções;
- 4- Capoeira: áreas com vegetação secundária, sem a presença de araucária ou folhosas de grande porte (FIGURA 8);
- 5- Pinus: os povoamentos são áreas determinadas pelo homem, e, normalmente, mantêm as suas áreas/perímetros inalteradas ao longo dos anos. Assim sendo, foram consideradas todas as áreas com povoamento de *Pinus* sp., independentemente da idade (FIGURA 9);
- 6- Campo com araucária: são áreas de campo, cobertas com gramíneas e com algumas araucárias dispersas (FIGURA 10). Essa classe corresponde ao tipo III (ver item 3.1);
- 7- Folhosas com araucária: áreas mistas de araucárias e folhosas, onde o estrato superior é dominado pelas folhosas, com algumas araucárias esparsas (FIGURA 11). Essa classe corresponde aos tipos II e IV (ver item 3.1), ou ainda ao grupo "a" (ver item 3.1.3);
- 8- Araucária densa: áreas onde no estrato superior há o domínio das araucárias (FIGURA 12). Essa classe corresponde ao tipo I (ver item 3.1), ou ainda ao grupo "b" (ver item 3.1.3).

FIGURA 7 - ASPECTO DE UMA ÁREA DE BANHADO



FIGURA 8 - ASPECTO GERAL DE UMA CAPOEIRA





FIGURA 9 - ÁREA DE PINUS



FIGURA 10 - ÁREA DE CAMPO COM ARAUCÁRIA





FIGURA 11 - ASPECTO GERAL DE FOLHOSAS COM ARAUCÁRIA



FIGURA 12 - ÁREA DE ARAUCÁRIA DENSA



### 3.3.2 Pré-Processamento da Imagem de Satélite

Como a imagem de satélite adquirida era uma cena completa, foi feito um recorte desta imagem. Para isso, a primeira providência foi localizar as áreas de estudo nesta imagem. Isto foi feito com o auxílio de cartas na escala de 1:100.000 e de relatórios de trabalhos realizados na área. A imagem utilizada ficou com um tamanho de 2000 x 1000 pixels.

Para o georeferenciamento foram coletados, inicialmente, 12 pontos de controle. As coordenadas desses 12 pontos foram retiradas da Carta do Brasil na escala de 1:100.000; folha SG-22-Y-B-III (IBGE).

A reamostragem foi feita pelo método do vizinho mais próximo, utilizando-se o polinômio de primeiro grau. Na reamostragem pelo método do vizinho mais próximo não há o processo de interpolação dos níveis de cinza. Isso garante à imagem georeferenciada os mesmos valores (níveis de cinza) dos pixels originais (RESEARCH SYSTEMS, 1999).

Dos 12 pontos inicialmente coletados, foram selecionados 8 pontos, onde o erro quadrático total dos pontos de controle, ficou em 0,4 pixel.

### 3.3.3 Processamento da Imagem de Satélite

#### 3.3.3.1 Análise da componentes principais

A análise das componentes principais tem sido um recurso utilizado nas análises de dados digitais de sensoriamento remoto. A transformação de dados usando a técnica das componentes principais pode resultar em novas imagens que são visualmente mais interpretáveis do que os dados originais. Ainda, a análise das componentes principais é usada para comprimir as informações contidas em um certo número de bandas em apenas duas ou três componentes principais. No entanto, essa redução da dimensionalidade dos dados deve ser analisada quanto aos resultados produzidos para que se tenha certeza de que os dados transformados sejam tão bons quanto os dados originais (JENSEN, 1986).

Embora a transformação por componentes principais seja uma técnica utilizada para o realce dos alvos de uma imagem de satélite, para que ela seja usada deve-se ter um bom conhecimento das características da área de estudo (WATRIN, 1994).

A técnica das componentes principais foi aplicada nas 4 bandas originais, objetivando encontrar mais uma alternativa para a composição das bandas que fosse mais interpretável que os dados originais.

### 3.3.3.2 Definição das bandas a serem utilizadas

Uma etapa importante é encontrar uma composição que melhor apresente as oito classes definidas. Isto contribui na escolha e na delimitação das amostras de treinamento.

Para selecionar quantas e quais as bandas seriam utilizadas para a classificação, foram testadas três diferentes composições:

- a) utilizando-se as quatro bandas originais (3, 4, 5 e 7);
- b) utilizando-se apenas três bandas originais (3, 4, e 5);
- c) utilizando-se as três primeiras componentes principais.

### 3.3.4 Classificação da Imagem de Satélite

Na classificação supervisionada da imagem de satélite, a identidade e localização de alguns tipos de cobertura como floresta, banhado, campo, são conhecidos a priori através da combinação de dados de campo, fotografias aéreas, mapas e experiência pessoal (JENSEN, 1986).

A existência de dados sobre a área de estudo provenientes de inventários e complementados com o trabalho de campo, possibilitou o reconhecimento dos alvos na imagem de satélite. Assim sendo, optou-se por utilizar a classificação supervisionada, que permite um maior controle sobre o processo de classificação.



Com relação ao algoritmo de classificação, foi utilizado o método "Máxima Verossimilhança" por ser um método mais eficaz nos estudos que envolvem a cobertura vegetal e que traz resultados mais consistentes comparando com outros métodos como o do Paralelepípedo e da Mínima Distância (FULLER et al., 1994; WATRIN, 1994; SILVEIRA, 1997).

Segundo RICHARDS (1993), a principal diferença entre a classificação pela mínima distância e a máxima verossimilhança é que esta envolve nos seus cálculos a matriz de covariância. O algoritmo da máxima verossimilhança consiste num princípio estatístico paramétrico, onde são consideradas as classes envolvidas e uma função densidade de probabilidade gaussiana, enquanto o método pela mínima distância classifica um pixel com base apenas na sua distância a partir das médias. Como resultado dessa diferença de processos estatísticos, é esperado um melhor desempenho para a classificação pela Máxima Verossimilhança.

A seleção das amostras de treinamento é um processo iterativo. O analista revisa as estatísticas das amostras até que elas estejam suficientemente separáveis espectralmente. Isto é, o conjunto original das amostras de treinamento têm suas estatísticas analisadas, sempre que uma amostra é adicionada, apagada ou combinada com outras amostras, até que o conjunto final das amostras de treinamento seja definido e possa ser usado na classificação.

As amostras de treinamento foram selecionadas através de múltiplas amostras, ou seja, para cada classe foram definidas várias unidades amostrais. Cada unidade amostral tinha um tamanho inicial que variava entre 5 e 15 pixels, tentando-se manter certa homogeneidade espectral dentro destas unidades amostrais.

As amostras foram definidas pela expansão das unidades amostrais. Esta expansão foi baseada na estatística dos níveis de cinza dos pixels que formavam a unidade amostral. Todos os valores dos quatro pixels vizinhos que estivessem dentro da amplitude (média  $\pm$  um desvio padrão) foram incluídos na amostra.

Esse procedimento foi controlado de três formas:

- a) visualmente na tela, ou seja, quando a expansão de uma unidade amostral ocorria de uma maneira não desejada (atingindo outras classes que eram facilmente separáveis na própria tela do computador). Neste caso, a unidade amostral era apagada e novos pixels coletados;
- b) uma vez que a primeira condição estivesse satisfeita, verificou-se a estatística da amostra. Segundo JENSEN (1986); LILLESAND e KIEFER (1987); NOVO (1993), é importante que a amostra de treinamento seja bastante homogênea e representativa da classe de interesse. Uma forma de avaliar a homogeneidade das amostras de treinamento é examinar seu histograma. Uma amostra homogênea terá um histograma unimodal;
- c) ainda conforme NOVO (1993) e RICHARDS (1993), outro aspecto importante na seleção de amostras de treinamento é o seu tamanho. O número de pixels das áreas de treinamento deve ser suficientemente grande para permitir a estimativa das características espectrais da classe. Conforme Dutra (1982) citado por WATZLAWICK (2000), este número deve estar entre 20 e 100 n. Segundo SWAIN e DAVIS (1978), recomenda-se na prática uma quantidade de pixels mínima de 10 n para cada classe, caso seja possível, 100 n é um número desejável (onde: n = nº bandas).

Depois que as três condições fossem atendidas, tinha-se várias unidades amostrais e o conjunto dessas amostras definindo uma classe. Uma vez definidas as amostras de treinamento foi feita uma pré-classificação para mais uma avaliação das amostras através da matriz de confusão.

Segundo LILLESAND e KIEFER (1987), não existe uma metodologia simples e única para determinar a acurácia de uma classificação. Neste estudo utilizou-se os índices de acurácia total e o coeficiente Kappa.

A acurácia total (5) é obtida a partir da matriz de confusão. O valor é calculado pela divisão da soma dos elementos da diagonal principal da matriz, ou seja, o número de classificações corretas pelo número total de pixels das amostras utilizadas.

$$\text{acurácia total} = \frac{X_{ii}}{N} 100 \quad (5)$$

onde:  $N$  = número total de pixels na matriz

$X_{ii}$  = diagonal principal da matriz

O coeficiente Kappa (6), desenvolvido por COHEN (1960), é outra medida de acurácia da classificação. Ele avalia a concordância de resultados da classificação com sua informação de referência obtida pelo mapa, trabalho de campo ou fotografias aéreas entre outros. Após esta verificação, uma matriz de erro pode ser construída para avaliar o desempenho de sua classificação. Este coeficiente utiliza todos os elementos da matriz para o seu cálculo e é recomendado como o método padrão na avaliação da acurácia temática (CHEN, 1996).

$$\text{Kappa} = \frac{NX_{ii} - X_{i+} X_{+i}}{N^2 - X_{i+} X_{+i}} \quad (6)$$

onde:  $N$  = número total de pixels na matriz

$X_{ii}$  = diagonal principal da matriz

$X_{i+}$  = soma de todas as colunas da linha  $i$

$X_{+i}$  = soma de todas as linhas da coluna  $j$

O coeficiente Kappa varia entre -1 e +1 e expressa a proporção na redução de erros alcançada por um classificador, quando comparado com o erro de um classificador completamente aleatório.

Kappa é um índice que tem as seguintes propriedades (COHEN, 1960):

- a) se a classificação é 100% correta, então  $\text{Kappa} = 1$ ;
- b) se a proporção observada é maior que a proporção esperada,  $\text{Kappa} > 0$ ;
- c) se a proporção observada é igual que a proporção esperada, então  $\text{Kappa} = 0$ ;
- d) se a proporção observada é menor que a proporção esperada,  $\text{Kappa} < 0$ .

### 3.3.5 Aplicação de Filtros

Uma das etapas necessárias para a análise da dimensão fractal foi o preparo da imagem classificada para calcular a área e o perímetro de cada região.

Uma imagem classificada freqüentemente manifesta uma aparência com vários pixels isolados, devido à própria variabilidade espectral encontrada pelo classificador quando aplicada à classificação pixel a pixel (LILLESAND e KIEFER, 1987).

O pixel isolado é indesejável para o cálculo da dimensão fractal, uma vez que a relação perímetro-área resulta numa constante, portanto, para qualquer classe o valor seria o mesmo. Assim sendo, buscou-se alternativas para a eliminação desses pixels isolados.

Para se eliminar os pixels isolados da imagem classificada, três alternativas foram feitas:

- a) aplicação de um filtro de moda: nesta operação, uma janela com tamanho de 3 x 3 pixels foi passada sobre a imagem de satélite classificada e o valor de maior freqüência de uma classe foi determinada nesta janela. O pixel central é comparado com os oito pixels vizinhos. Se o pixel no centro da janela não fosse da classe majoritária, sua identidade seria mudada para a classe majoritária. Se o esse pixel já fosse da classe majoritária, ou caso não houvesse uma classe majoritária na janela, o pixel central não mudava;
- b) aplicação de uma combinação de filtros: foram utilizados três tipos de filtros. Dois desses filtros utilizaram operadores morfológicos para conectar pixels que fossem similares à determinada classe e que estivessem adjacentes à ela. As classes selecionadas foram conectadas por operações conjuntas de dilatação e erosão. Assim sendo, um primeiro filtro removeu os pixels isolados usando a dilatação. Determinou-se o menor agrupamento a ser mantido numa classe (por exemplo, 3 pixels). Cada pixel na imagem foi comparado com os seus oito pixels vizinhos. Se o pixel central não tivesse nenhum vizinho da mesma classe (pixel isolado), ou ainda, se o agrupamento (por exemplo, 2

- pixels) fosse menor que o valor inicialmente determinado pelo operador (3 pixels), esses pixels eram eliminados. Quando removidos, pixels de valor zero foram deixados no lugar. Para substituir esses pixels não classificados, utilizou-se um segundo filtro. Ele trabalha erodindo os pixels negros (valor zero), filtrando apenas as classes selecionadas. Mesmo com a aplicação do segundo filtro, pixels isolados que estivessem no limite entre duas classes permaneceram inalterados. Para estes casos, um terceiro filtro (combinação de classes) foi aplicado, agrupando esses pixels isolados a uma classe determinada pelo operador
- c) eliminação dos pixels isolados na planilha de cálculo da regressão: o terceiro método utilizado não foi nenhuma aplicação de filtro. A eliminação dos pixels isolados foi feita diretamente na planilha de cálculo utilizada para a regressão. A imagem, com todos os pixels isolados, foi vetorizada e exportada para o *software* ArcView. Foram calculadas as áreas e perímetros dos fragmentos selecionados. Depois a tabela foi exportada para o Excel, onde foi ordenada de acordo com o tamanho das áreas. Dessa forma, todas as áreas menores que um pixel ( $30 \times 30 \text{ m} = 900 \text{ m}^2$ ) foram eliminadas. Então, a tabela foi complementada com as respectivas transformações necessárias para se efetuar a regressão linear para determinar a dimensão fractal e o parâmetro de Pareto.

Como as imagens estavam com um tamanho ainda superior aos limites da fazenda, foram eliminadas as áreas externas (haja vista que nas áreas externas à fazenda não foi feito a checagem de campo, portanto essas áreas poderiam estar classificadas incorretamente). Esta operação foi feita em duas etapas, através da aplicação de duas máscaras. Essas máscaras foram digitalizadas sobre a imagem de satélite na própria tela do computador. Depois, as duas máscaras, também foram exportadas em *layers* diferentes para o *software* ArcView.

Uma primeira máscara foi utilizada para a eliminação das áreas excedentes (áreas externas e sem contato com o perímetro da fazenda). Outra máscara, com o contorno da fazenda, foi aplicada para separar as regiões

conhecidas que, mesmo extrapolando os limites da fazenda, foram mantidas para não alterar a forma desses fragmentos.

Após as filtragens e a aplicação das máscaras, foram executados os cálculos das áreas e perímetros no próprio ArcView. Depois essas tabelas foram exportadas para o Excel onde foram complementadas com as respectivas transformações necessárias para se efetuar a regressão linear para determinar a dimensão fractal e o parâmetro de Pareto.

### 3.3.6 Análise Fractal

Segundo GAINES (1999), a maioria dos índices fractais podem ser facilmente calculados com métodos simples de regressão; e ainda, a dimensão fractal calculada pela relação perímetro-área é o índice fractal mais utilizado.

Sendo assim, neste estudo optou-se pelo método que envolve os cálculos da dimensão fractal "D" em função da área e do perímetro, e os valores do parâmetro de Pareto "a" para cada classe.

A imagem vetorizada ficou composta por oito *layers*, sendo que cada *layer* correspondia a uma classe. Ainda no próprio *software* ArcView foi gerada uma planilha para cada classe onde foram calculadas as áreas e os perímetros de cada fragmento.

Essas oito planilhas foram exportadas para o Excel, onde foram complementadas com as transformações necessárias, requeridas por cada equação. Através de uma regressão linear foram obtidos os valores da dimensão fractal "D" para cada classe, e por uma segunda regressão linear definiu-se o parâmetro de Pareto "a" para cada classe.

#### 3.3.6.1 Análise da dimensão fractal

A determinação da dimensão fractal "D" pode ser feita por várias metodologias (ver item 2.2.3). Neste estudo, optou-se pelo cálculo baseado na relação área-perímetro, por ser um método simples e bastante utilizado (DeCOLA,

1989; LaGRO, 1991; ZEIDE, 1993; BATISTELLA e SOARES, 1999; PUZACHENKO, 2000).

A partir da imagem classificada, filtrada e vetorizada, foi encontrada a dimensão fractal "D" para cada classe. Esse valor foi obtido pela regressão, através da relação entre o perímetro e a área de todos os fragmentos que formavam uma classe.

O cálculo da dimensão fractal é dado pela equação:

$$p_j = cs_j^{(D/2)} \quad (7)$$

onde:

$p$  = perímetro do fragmento  $j$

$c$  = coeficiente de forma

$s$  = área do fragmento  $j$

$D$  = dimensão fractal da classe  $i$

Esta equação (7) foi aplicada separadamente para cada classe, de forma que cada uma das oito classes teve um valor de dimensão fractal "D" específico.

Esse valor da dimensão fractal "D" calculado deve refletir o padrão espacial de cada classe, onde  $1 \leq D \leq 2$ . As classes cujos fragmentos apresentarem uma borda mais lisa deverão ter um valor de "D" próximo a 1, enquanto as classes cujos fragmentos tiverem uma borda mais complicada (sinuosa) apresentarão um valor de  $D > 1$ , ou seja, próximo a 2.

### 3.3.6.2 Análise do parâmetro de Pareto

O parâmetro de Pareto também foi utilizado, para descrever como estava a distribuição dos fragmentos de cada classe quanto ao tamanho.

Esta análise de Pareto foi baseada em outra característica importante dos fractais, que é o fenômeno da escala, ou seja, é a tendência dos conjuntos fractais não terem um tamanho único. Baseando-se neste conceito, GOODCHILD e MARK (1987) e DeCOLA (1989) mostraram que existe uma certa relação na

distribuição dos fragmentos de uma classe quanto ao tamanho. Por exemplo, a relação existente entre os dois maiores fragmentos de uma classe será similar a relação existente entre o 10º e o 20º fragmento, respeitando-se uma certa proporção. Isto geralmente, resulta numa relação hiperbólica.

Portanto, esta análise foi feita a partir da relação entre o fragmento e o seu grau (ou *ranking*). O grau de cada fragmento foi determinado pela comparação do seu tamanho com os demais de uma mesma classe (acrescidas de uma unidade). Assim sendo, foi estabelecido um *ranking* onde o maior fragmento de uma classe recebeu o grau dois, o segundo maior o grau três e assim sucessivamente até o último fragmento. Os cálculos foram feitos utilizando-se da relação hiperbólica dada pela seguinte equação:

$$s_j = Ar_j^{-b} \quad (8)$$

onde:

$s$  = área do fragmento  $j$

$A; b$  = coeficientes

$r$  = *ranking* ou grau do fragmento  $j$

Esta equação (8) foi aplicada separadamente para cada classe, de forma que cada classe teve um valor para o parâmetro de Pareto "a" específico.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação dos resultados procurou seguir a mesma seqüência das atividades descritas na metodologia (ver item 3.3).

As figuras (imagens de satélite e gráficos) e algumas tabelas, assim como a discussão dos resultados também foram apresentados no mesmo item dos resultados de cada atividade. Ainda, existem outras tabelas (planilhas de cálculo, resultados da regressão e matrizes de confusão) que foram apresentadas como anexos.

### 4.1 COMPONENTES PRINCIPAIS

Os resultados mostraram que as três primeiras componentes principais já representavam 99,27% da variabilidade total (dos níveis de cinza) existente no conjunto das quatro bandas (TABELA 3) .

TABELA 3 - RESULTADOS DA ANÁLISE DAS COMPONENTES PRINCIPAIS

CP	Autovalor	%	%Acumulado
$\lambda_1$	383,88	71,13	71,13
$\lambda_2$	139,11	25,76	96,89
$\lambda_3$	12,84	2,38	99,27
$\lambda_4$	3,86	0,73	100

Observa-se na TABELA 3 que a imagem formada pela primeira componente principal (CP)  $\lambda_1$ , já representa 71,13% das informações (níveis de cinza) contidas nas quatro bandas. Isto significa que 71,13% são informações redundantes. Da mesma forma, a imagem formada pela segunda componente principal  $\lambda_2$ , é composta por informações que se repetem em três das quatro bandas originais, e que corresponde a 25,76% das informações. As informações que se repetem em duas bandas representam 2,38%, e formam a imagem da terceira componente principal  $\lambda_3$ . A composição colorida formada por essas três

primeiras componentes principais ( $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$ ) resulta num total acumulado de 99,27%. E a imagem formada pela quarta componente principal representa apenas 0,73% das informações contidas nas quatro bandas. São as informações que não se repetem em duas ou mais bandas, ou seja, são exclusivas de apenas uma banda.

O produto resultante da transformação por componentes principais caracterizou-se por apresentar um grande contraste entre as cores. A maior contribuição desta técnica de realce foi a capacidade da mesma de criar nuances de cores de modo a permitir a separação de classes de uso do solo espectralmente próximas, e que muitas vezes, apresentavam limitações de serem detectadas por outras composições que foram testadas. Por exemplo, numa composição RGB-543, algumas áreas de água não puderam ser separadas do pinus, em outras áreas, o pinus jovem confundia-se com a capoeira. Com a imagem da composição colorida formada pelas três primeiras componentes principais essas áreas puderam ser diferenciadas.

Portanto, a composição colorida que permitiu a melhor visualização das classes ficou para a imagem formada a partir das três primeiras componentes principais. Isto se justifica pelo fato de que, com o cálculo das principais componentes, foi possível reunir praticamente toda a variabilidade existente nas quatro bandas em apenas três componentes.

Contudo, mesmo apresentando um grande realce dos alvos, os resultados numéricos das componentes principais eram de interpretação mais complicada, quando comparada com as quatro bandas. Por isso, as análises estatísticas foram baseadas nas quatro bandas originais. A imagem formada pelas três primeiras componentes principais foi utilizada apenas como um recurso para a análise visual, ou seja, para a identificação dos alvos.

## 4.2 SELEÇÃO DAS BANDAS

O teste utilizando-se apenas três bandas originais (RGB-543) foi feito para uma possível redução do número de bandas.

A escolha pelas 3 bandas (3, 4 e 5) pode ser explicada pelos resultados mostrados na TABELA 4. A banda cinco apresentou alta correlação com a banda sete, ambas da região do infra-vermelho. No entanto, observa-se uma maior correlação existente entre as bandas 3 e 7. Dessa forma, optou-se pelas bandas 3, 4 e 5 para o teste.

TABELA 4 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO

BANDAS	3	4	5	7
3	1.0	-0.02	0.63	0.8
4		1.0	0.5	0.2
5			1.0	0.88
7				1.0

Mesmo com a alta correlação apresentada pelas bandas 5 e 7, a inclusão da banda sete (somado às bandas originais 3, 4 e 5) no processo de classificação mostrou resultados mais satisfatórios.

## 4.3 ANÁLISE DA SEPARABILIDADE

Apesar da imagem formada pelas três primeiras componentes principais ter proporcionado um maior contraste entre os alvos, os maiores índices de acurácia foram apresentados pela classificação com as quatro bandas originais 3, 4, 5 e 7. Os índices de acurácia apresentados pela classificação com as três primeiras componentes principais foram ligeiramente melhores que os apresentados pelas três bandas originais. Os índices de acurácia apresentados pelas classificações estão na TABELA 5.

TABELA 5 - ÍNDICES DE ACURÁCIA PARA AS TRÊS CLASSIFICAÇÕES

índice	3 bandas originais	4 bandas originais	3 principais componentes
acurácia total %	95,0	95,5	95,1
Kappa	0,94	0,95	0,94

Todas as classificações apresentaram um resultado bastante próximo (TABELA 5). No entanto, embora as diferenças sejam pequenas, elas foram importantes na separação de algumas classes. As maiores taxas de confusão ocorrem nas classes banhado / folhosas com araucária / capoeira.

No caso do banhado, as taxas de confusão não diminuíram com a inclusão da banda 7. Isto se justifica porque o comportamento das áreas úmidas (água) é praticamente a mesma em toda a faixa do infra-vermelho.

Já no outro grupo que envolve a vegetação folhosas com araucária / capoeira, a confusão ocorre pelas condições naturais da vegetação. A araucária está presente em toda a área, variando apenas quanto a sua densidade por área.

A transição de uma floresta de araucária para uma floresta com domínio de folhosas acontece de maneira sutil, e, ainda assim, com algumas araucárias presentes, o que causa a confusão. O mesmo ocorre com a mudança de uma área de floresta de folhosas para uma capoeira. Entre as duas classes também não existe uma linha definindo os contornos, mas sim, uma faixa de transição onde os pixels podem ser confundidos.

Para essa situação de confusão entre as classes folhosas com araucária e capoeira, a inclusão da banda sete trouxe uma melhora de aproximadamente 1% na acurácia total. Isto poderia ser justificado porque a classe folhosas com araucária apresenta uma vegetação com maior teor de umidade em relação à vegetação predominante na classe capoeira, e essa diferença pode ser melhor captada pela banda 7.

Poderia se esperar uma confusão maior entre a classe de pinus e a classe de araucária densa (ambas coníferas), mas, a separação foi mais fácil porque as áreas com pinus apresentaram (na imagem) um contorno bem definido, facilitando a instalação das amostras de treinamento.

Houve uma certa dificuldade para separar as classes de pinus e capoeira. A confusão entre essas classes foi devido aos talhões de pinus jovem. As áreas de pinus jovem caracterizam-se por apresentarem um dossel bastante aberto e com a presença de um sub-bosque. Dessa forma, a resposta espectral apresentada por essas áreas confundiu-se com as áreas de capoeira.

Ainda com relação ao pinus, existem as áreas com plantio recente. Neste caso, as mudas ainda pequenas, e sem a presença de uma cobertura no solo, fizeram com que essas áreas se apresentassem na imagem de satélite como uma área de solo exposto.

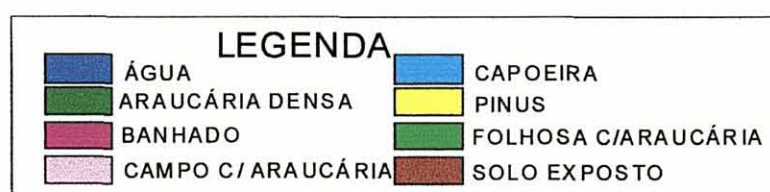
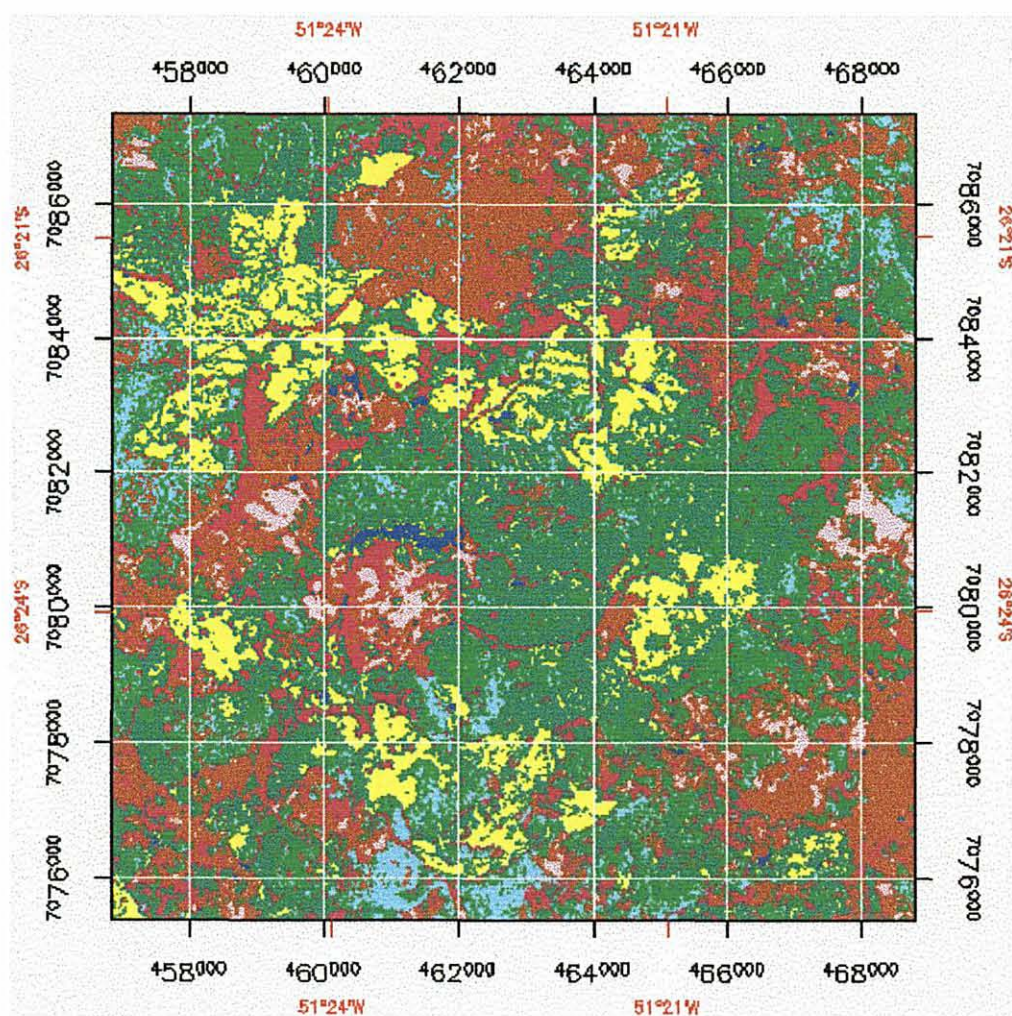
#### 4.4 CLASSIFICAÇÃO

A classificação final foi feita com base nas quatro bandas originais 3, 4, 5 e 7. A imagem resultante dessa classificação pode ser vista na FIGURA 13. Para a avaliação da acurácia do classificador, um novo conjunto de amostras de treinamento para cada classe foi determinado.

O índice da acurácia total ficou em 91,5%, ou seja, houve um decréscimo de 4,0% em relação ao primeiro conjunto de amostras que apresentou um índice de 95,5%. O índice Kappa que estava em 0,95, ficou em 0,90.

Estes resultados podem ser considerados normais, uma vez que o primeiro conjunto de amostras de treinamento, que foi efetivamente utilizado para classificar a imagem e para a escolha das bandas, foi rigorosamente selecionado. Já o segundo conjunto de amostras que não foi utilizado para a classificação, mas apenas para avaliar a acurácia dessa classificação, foram escolhidos pontos de lugares conhecidos. Para assegurar a homogeneidade dentro de cada amostra, o tamanho de cada unidade amostral foi de aproximadamente nove pixels.

FIGURA 13 - IMAGEM CLASSIFICADA DA ÁREA DE ESTUDO (RGB-543)



#### 4.5 PREPARO DA IMAGEM PARA A ANÁLISE FRACTAL

No preparo da imagem para a análise fractal, procurou-se analisar também a alteração, principalmente nos contornos dos fragmentos, provocado por cada um dos procedimentos utilizados. O preparo da imagem para a análise fractal resultou em três imagens para o desenvolvimento do trabalho:

- a) *imagem sem filtro*: a eliminação dos pixels isolados na planilha de cálculo da regressão. Esta imagem foi a que apresentou o maior número de fragmentos em todas as classes. Isto pode ser explicado porque foram mantidas todas as áreas acima de dois pixels. Este procedimento permitiu um controle fácil e prático para a seleção quanto ao tamanho mínimo dos fragmentos a serem incluídos nos cálculos. A eliminação dos pixels isolados na planilha de cálculo foi utilizada como uma alternativa, no entanto, deve ser observado que, neste procedimento, os pixels isolados (não selecionados) foram totalmente excluídos, ou seja, não foram incorporados a nenhuma outra classe;
- b) *imagem filtrada com o filtro de moda*: foi utilizado o filtro de moda com uma janela de 3x3 pixels. Como a unidade base para delimitar os contornos dos fragmentos foram três pixels, houve uma perda de detalhes pela simplificação dos contornos de muitos fragmentos. Esta imagem foi a que resultou no menor número de fragmentos em todas as oito classes;
- c) *imagem filtrada utilizando-se uma combinação de filtros*: esses filtros permitiram um maior controle sobre o processo de filtragem. Cada classe pôde ser filtrada separadamente, e o tamanho da janela também pôde ser controlado de modo que os perímetros dos fragmentos não sofressem muita alteração. A utilização da combinação de filtros, devido às interações que são necessárias, tornou essa filtragem num processo lento. A imagem resultante dessa classificação pode ser vista na FIGURA 14.



FIGURA 14 - IMAGEM CLASSIFICADA E FILTRADA (FILTRO DE MODA) DA ÁREA DE ESTUDO

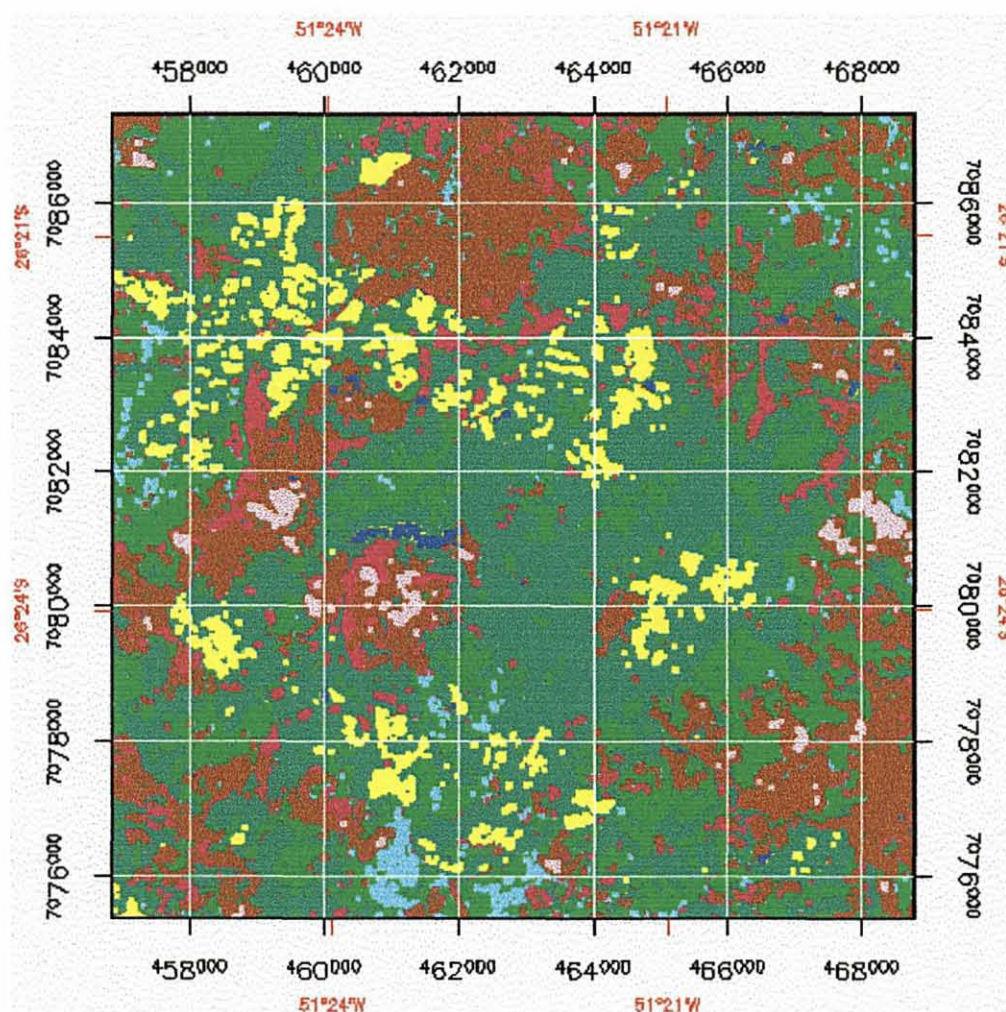
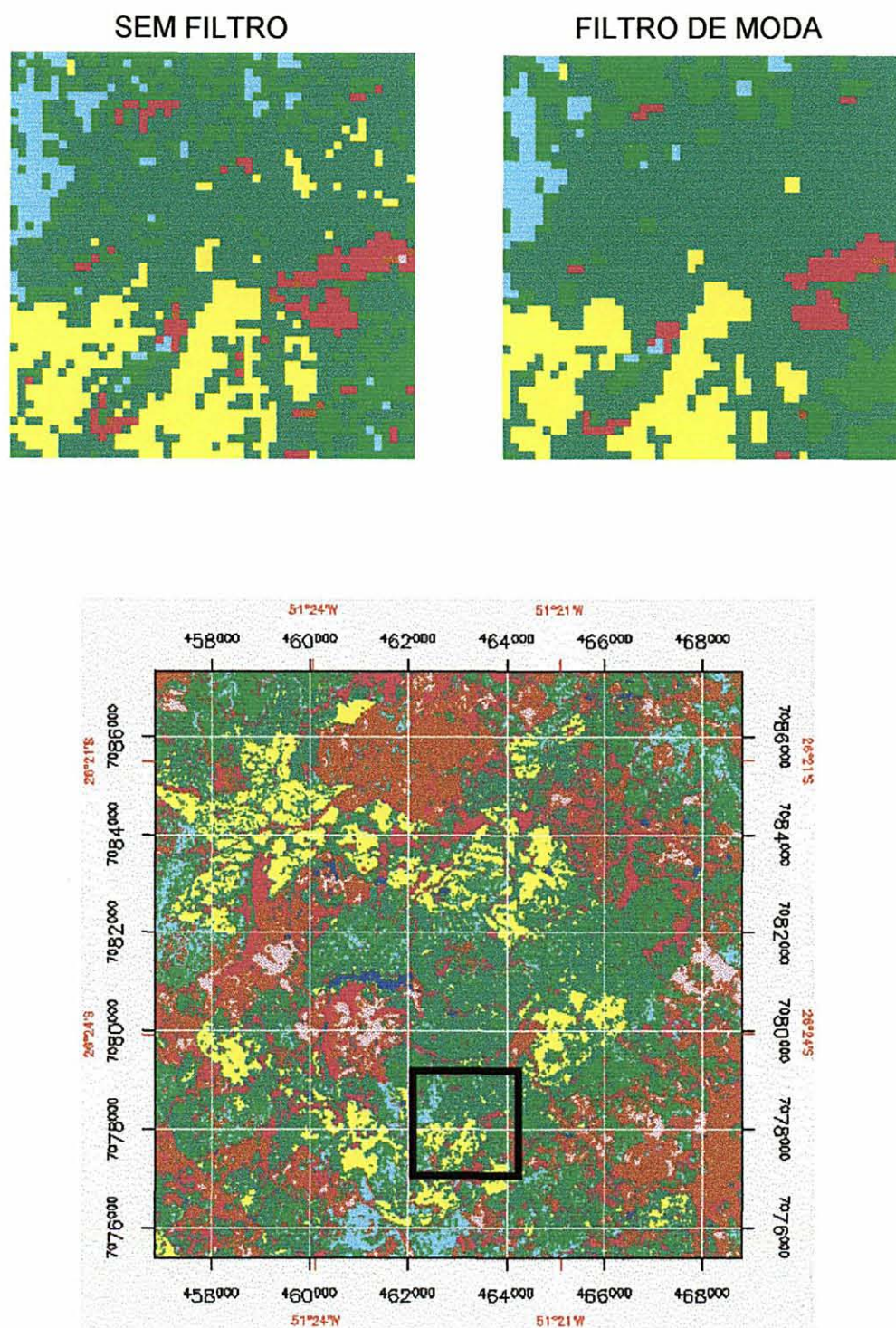




FIGURA 15 - COMPARAÇÃO ENTRE AS IMAGENS SEM FILTRO E COM O FILTRO DE MODA



Como produto da eliminação dos pixels isolados, obteve-se três imagens com número e tamanho de fragmentos diferentes. Isto resultou em três imagens com tamanho total da imagem também diferente.

Essas diferenças nos tamanhos das imagens podem ser explicadas pela aplicação das máscaras (ver item 3.3.5). No processo de aplicação das máscaras, a inclusão de fragmentos que extrapolavam os limites da fazenda, também variou em número e tamanho, dependendo da imagem.

#### 4.6 DIMENSÃO FRACTAL "D"

De acordo com o item 3.3.6.1, a dimensão fractal pode ser calculada através da relação existente entre a área e o perímetro dos fragmentos de cada classe. Um exemplo dessa relação linearizada (2) pode ser visto na FIGURA 15, onde foram plotados o logaritmo natural da área x logaritmo natural do perímetro da classe araucária densa.

Através da regressão foi encontrado o valor da dimensão fractal "D" para cada uma das oito classes nas três imagens classificadas (totalizando 24 planilhas de cálculo para regressão). Os resultados com os valores da dimensão fractal "D" de cada classe para as três imagens e os respectivos coeficientes de correlação  $R^2$  podem ser vistos na TABELA 6.

FIGURA 15 - GRÁFICO DO  $\ln \text{ÁREA}$  X  $\ln \text{PERÍMETRO}$  (ARAUCÁRIA DENSE SEM FILTRO)

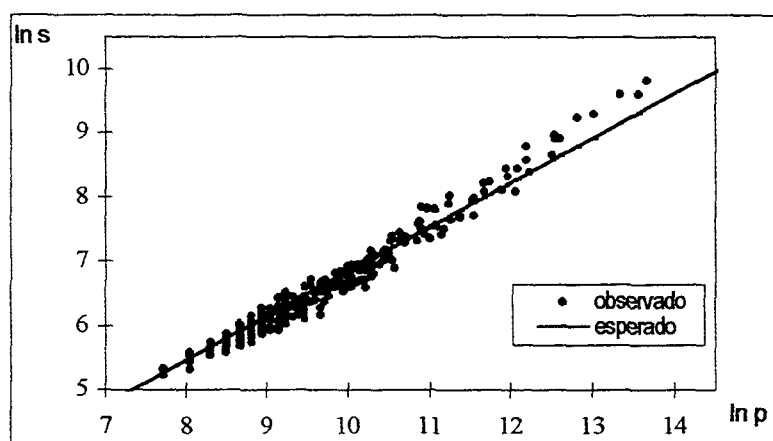


TABELA 6 - VALORES DE "D" PARA AS OITO CLASSES DE USO DO SOLO E OS RESPECTIVOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO  $R^2$  (PARA AS TRÊS IMAGENS)

Classe	Tipos de Filtragem					
	Sem Filtro		Composição de Filtros		Filtro de Moda	
	D	$R^2$	D	$R^2$	D	$R^2$
1 Água	1,30	0,98	1,24	0,97	1,16	0,98
2 Araucária Densa	1,47	0,98	1,38	0,98	1,33	0,98
3 Banhado	1,40	0,98	1,33	0,98	1,28	0,97
4 Campo c/ Araucária	1,32	0,98	1,24	0,99	1,14	0,98
5 Capoeira	1,34	0,98	1,28	0,98	1,25	0,97
6 Folhosa c/ Araucária	1,42	0,98	1,30	0,98	1,28	0,98
7 Pinus	1,35	0,98	1,35	0,98	1,27	0,98
8 Solo Exposto	1,43	0,98	1,34	0,98	1,32	0,98

Para todas as classificações (três imagens), a estimativa da dimensão fractal "D" para qualquer uma das oito classes, através da relação perímetro-área, teve um bom desempenho. Apesar de algumas classes terem apresentado um pequeno número de dados (fragmentos), os ajustes para determinar a dimensão fractal "D" podem ser considerados bons. Sendo que o menor coeficiente de

correlação ( $R^2$ ) encontrado para a regressão foi para a classe capoeira (filtro de moda) com  $R^2 = 0,97$ .

Observa-se ainda que, diferentes valores de "D" foram encontrados para uma mesma classe, dependendo da classificação utilizada (dependendo do tipo de filtragem). Isto se justifica porque alguns fragmentos tiveram o seu perímetro e área alterados, ou ainda foram agrupados com outros fragmentos, dependendo do filtro utilizado conforme descrito no item 3.3.5.

Estes resultados estão de acordo com MILNE (1991). O autor mostrou que as estimativas da relação área-perímetro para fragmentos estão limitadas ao tamanho do pixel (ou da janela utilizada na filtragem). Os fragmentos pequenos estão mais sujeitos a erros de cálculo, porque são muito influenciados por um pequeno número de pixels. Por exemplo, a dimensão fractal de um fragmento pequeno pode ser grandemente afetada por apenas um ou dois pixels.

Entretanto, apesar da diferença nos valores, pode-se dizer que uma certa proporção foi mantida entre as classes nas três classificações. Por exemplo, a classe araucária densa apresentou a maior dimensão fractal "D" em todas as três imagens. As classes água e campo com araucária foram as classes que apresentaram os menores índices de "D".

#### 4.7 PARÂMETRO DE PARETO "a"

Conforme descrito no item 3.3.6.2, a relação existente entre a área e o *ranking* dos fragmentos resulta numa curva hiperbólica. Um exemplo dessa relação hiperbólica (8) pode ser visto na FIGURA 16, onde foram plotados a área x *ranking* da classe araucária densa. Na FIGURA 17, pode ser vista a mesma relação linearizada, onde foram plotados o logaritmo natural da área x logaritmo natural do *ranking*.

FIGURA 16 - GRÁFICO DA ÁREA X *RANKING*, PARA A CLASSE ARAUCÁRIA Densa (SEM FILTRO)

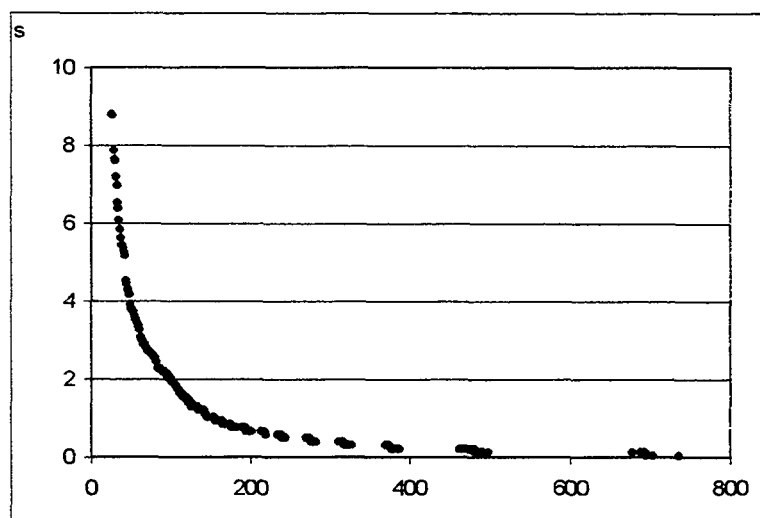
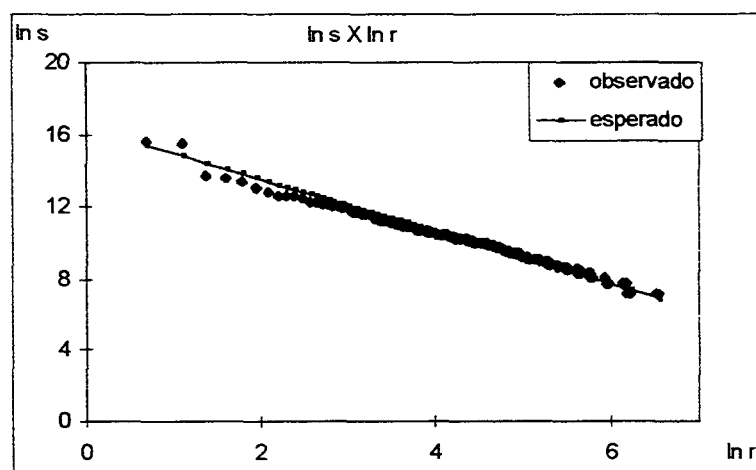


FIGURA 17 - GRÁFICO DO  $\ln$  ÁREA X  $\ln$  *RANKING*, PARA A CLASSE ARAUCÁRIA Densa (SEM FILTRO)



Através da regressão foi encontrado o valor do parâmetro de Pareto "a" para cada uma das oito classes nas três imagens classificadas. Os resultados com os valores de "a" e os respectivos coeficientes de correlação  $R^2$  podem ser vistos nas TABELA 7.

**TABELA 7 - VALORES DO PARÂMETRO DE PARETO "a" PARA AS OITO CLASSES DE USO DO SOLO E OS RESPECTIVOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO  $R^2$  (PARA AS TRÊS IMAGENS)**

Classe	Tipos de Filtragem					
	Sem Filtro		Composição de Filtros		Filtro de Moda	
	a	$R^2$	a	$R^2$	a	$R^2$
1 Água	13,43	0,96	13,54	0,95	14,54	0,90
2 Araucária Densa	15,77	0,98	16,37	0,99	17,35	0,97
3 Banhado	14,11	0,95	14,93	0,98	15,76	0,96
4 Campo c/ Araucária	14,16	0,92	14,68	0,98	14,66	0,84
5 Capoeira	11,83	0,96	13,68	0,95	13,59	0,96
6 Folhosa c/ Araucária	14,12	0,97	15,72	0,98	15,79	0,98
7 Pinus	15,87	0,96	16,86	0,97	16,60	0,96
8 Solo Exposto	13,64	0,99	15,03	0,98	15,10	0,97

Apesar de algumas classes terem apresentado um pequeno número de dados (fragmentos), os ajustes para determinar o parâmetro de Pareto "a" podem ser considerados bons. Os menores coeficientes de correlação ( $R^2$ ) foram encontrados para a imagem com filtro de moda. O ajuste da regressão apresentou um coeficiente de correlação  $R^2 = 0,84$  (campo com araucária) e  $R^2 = 0,90$  (água). Para as demais imagens, o menor coeficiente de correlação verificado foi  $R^2 = 0,92$  (campo com araucária / s/filtro).

Para os valores do parâmetro de Pareto "a" foi observado o mesmo comportamento da dimensão fractal "D" em relação diferentes tipos de filtragem, ou seja, foram encontrados diferentes valores de "a" para uma mesma classe. Da mesma forma, apesar da diferença nos valores, pode-se dizer que uma certa proporção foi mantida entre as classes nas três classificações. Por exemplo, a

classe araucária densa e pinus apresentaram os maiores valores para o parâmetro de Pareto "a" em todas as três imagens. As classes água e capoeira foram as classes que apresentaram os menores índices de "a".

#### 4.8 ANÁLISE FRACTAL

Os cálculos para a análise fractal foram aplicados para as imagens:

- a) imagem sem filtro;
- b) imagem filtrada pela combinação de filtros;
- c) imagem filtrada com filtro de moda.

Após os cálculos da dimensão fractal "D" e do parâmetro de Pareto "a", mais dois itens foram retirados das planilhas de cálculo, o número de pixels e o número de fragmentos de cada classe. Através desses dados, foi calculada a porcentagem que cada classe representa na imagem, tanto em pixels como em fragmentos.

Todos esses dados foram colocados em tabelas, e formaram a base para a análise fractal. A mostra os resultados para a imagem sem filtro, ou seja, onde os pixels isolados foram eliminados na planilha de cálculo. A TABELA 9 mostra os resultados para a imagem filtrada com a combinação de filtros e na TABELA 10 estão os resultados para a imagem filtrada com o filtro de moda.

TABELA 8 - ANÁLISE FRACTAL DAS OITO CLASSES DE USO DO SOLO (SEM FILTRO)

Classe	Imagem		Fragmentos		D	a
	nº de pixels	% da imagem	nº	%		
1 Água	596	0,99	16	0,68	1,3019	13,4327
2 Araucária densa	25218	41,80	548	23,21	1,4725	15,7726
3 Banhado	8839	14,65	623	26,39	1,3956	14,1144
4 Campo c/ araucária	1471	2,44	45	1,91	1,3230	14,1630
5 Capoeira	1635	2,71	218	9,23	1,3413	11,8326
6 Folhosa c/ araucária	9421	15,61	503	21,30	1,4203	14,1222
7 Pinus	9362	15,52	215	9,11	1,3506	15,8714
8 Solo exposto	3792	6,29	193	8,17	1,4249	13,6421
TOTAL	60334	100,00	2361	100,00		

TABELA 9 - ANÁLISE FRACTAL DAS OITO CLASSES DE USO DO SOLO (COMBINAÇÃO DE FILTROS)

Classe	Imagem		Fragmentos		D	a
	nº de pixels	% da imagem	nº	%		
1 Água	608	0,95	20	0,87	1,2417	13,5373
2 Araucária densa	26532	41,41	593	25,83	1,3836	16,3727
3 Banhado	8656	13,51	549	23,91	1,3305	14,9326
4 Campo c/ araucária	1370	2,14	30	1,31	1,2388	14,6818
5 Capoeira	2014	3,14	241	10,50	1,2817	13,6763
6 Folhosa c/ araucária	9869	15,40	486	21,17	1,3001	15,7229
7 Pinus	9630	15,03	193	8,41	1,3524	16,8607
8 Solo exposto	5390	8,41	184	8,01	1,3418	15,0305
TOTAL	64069	100,00	2296	100,00		

TABELA 10 - ANÁLISE FRACTAL DAS OITO CLASSES DE USO DO SOLO (FILTRO DE MODA)

Classe	Imagem		Fragmentos		D	a
	nº de pixels	% da imagem	nº	%		
1 Água	615	0,95	16	1,20	1,1610	14,5396
2 Araucária densa	27554	42,66	285	21,36	1,3326	17,3502
3 Banhado	10503	16,26	323	24,21	1,2832	15,7569
4 Campo c/ araucária	1046	1,62	31	2,32	1,1353	14,6627
5 Capoeira	2049	3,17	154	11,54	1,2493	13,5937
6 Folhosa c/ araucária	9525	14,75	282	21,14	1,2804	15,7889
7 Pinus	8706	13,48	128	9,60	1,2662	16,6039
8 Solo exposto	4590	7,11	115	8,62	1,3152	15,1043
TOTAL	64588	100,00	1334	100,0		



Os resultados mostram que as três imagens (TABELA 8 à TABELA 10) apresentaram diferentes quantidades de pixels e número de fragmentos para uma mesma classe, dependendo da filtragem utilizada. Essas diferenças nos tamanhos das imagens podem ser explicadas pela aplicação das máscaras (ver item 3.3.5).

Apesar da diferença em número de pixels e fragmentos, as três imagens apresentaram uma certa proporção na distribuição das classes quando analisadas pelo percentual de pixels e pelo percentual de fragmentos de cada classe.

Observa-se que a imagem sem filtro (TABELA 8) e a imagem filtrada com combinação de filtros (TABELA 9) apresentaram resultados mais próximos. Isto pode ser explicado porque nas duas imagens o processo de filtragem foi mais controlado, eliminando-se apenas os pixels isolados, procurando não simplificar o contorno dos fragmentos.

A imagem resultante da aplicação do filtro de moda (TABELA 10) utilizou uma janela de tamanho 3x3 pixels, o que simplificou bastante a imagem (ver item 3.3.5).

Para uma análise geral da paisagem, uma nova tabela foi construída (TABELA 11). Foram considerados os valores médios aproximados das três imagens, para cada uma das oito classes. As variáveis utilizadas foram, o percentual de área coberta por cada classe (% Imagem), o número de fragmentos em percentual (% Fragmentos), além da dimensão fractal (D) e do parâmetro de Pareto (a).

TABELA 11 - QUADRO RESUMO PARA ANÁLISE FRACTAL DAS OITO CLASSES DE USO DO SOLO (VALORES MÉDIOS DAS TRÊS IMAGENS)

classe	% Imagem	% Fragmentos	D	a
Água	1	1,0	1,25	13,55
Araucária densa	42	23,5	1,40	16,50
Banhado	15	25,0	1,33	15,00
Campo c/ araucária	2	2,0	1,25	14,60
Capoeira	3	10,0	1,28	13,33
Folhosa c/ araucária	15	21,0	1,37	15,52
Pinus	15	9,0	1,33	16,57
Solo exposto	7	8,5	1,34	14,84

Verificou-se que 42% da paisagem (mas apenas 23,5% dos fragmentos) foram classificados como araucária densa. Poucos fragmentos ocupando uma grande extensão. Isto mostra que os fragmentos da classe araucária densa podem ser considerados grandes quando comparados com os fragmentos de outras tipologias.

A classe folhosas com araucária constitui a segunda classe dominante, abrangendo 15% da paisagem e 21% dos fragmentos. A quantidade de fragmentos apresentada pela classe folhosas com araucária (21%), é quase a mesma apresentada pela classe de araucária densa (23,5%). No entanto, a área coberta pela araucária densa é quase três vezes a área coberta por folhosas com araucária. Isto mostra que, em média, os fragmentos da classe folhosas com araucária têm, aproximadamente, 1/3 do tamanho dos fragmentos da araucária densa.

A classe pinus também cobre, aproximadamente, 15% da paisagem, mas, com apenas 9% dos fragmentos. Esta relação mostra que há uma certa equivalência quanto ao tamanho médio dos fragmentos de pinus e dos fragmentos da classe araucária densa. Embora o tamanho médio apresentado pelos fragmentos de pinus e de araucária densa sejam próximos, a forma, ou melhor, a borda descrita por esses fragmentos são bem diferentes. Os fragmentos de pinus são talhões construídos pelo homem que, apesar de toda a preocupação

ecológica durante o planejamento, ainda são bem diferentes dos fragmentos da classe araucária densa. Os talhões de pinus apresentam uma borda mais lisa do que os fragmentos de araucária densa, como resultado, o valor da dimensão fractal "D" para a classe araucária densa ( $D = 1,4$ ) é maior do que para a classe pinus ( $D = 1,33$ ).

Somando-se a classe de folhosas com araucária com o pinus e a araucária densa, elas totalizam 72% da paisagem. Mostrando que a paisagem é dominada por florestas.

O maior número de fragmentos, 25% do total são banhados, ocupando, aproximadamente, 15% da paisagem. Neste caso, tem-se muitos fragmentos ocupando uma pequena área. Isto mostra que os fragmentos da classe banhado podem ser considerados pequenos quando comparados com fragmentos de outras classes.

No outro extremo, apenas 1% da cena foi classificada como água, e essa classe conta com 1% dos fragmentos.

A classe campo com araucária cobre uma área de 2%, com aproximadamente 2% dos fragmentos.

A classe solo exposto representa 7% da área da paisagem e 8,5% dos fragmentos.

A classe capoeira representa 3% da paisagem, mas tem uma participação de 10% na quantidade total de fragmentos. Esta relação mostra que a classe capoeira apresenta os menores fragmentos quando comparados com os fragmentos de outras classes.

Em uma primeira etapa, a análise da paisagem pôde ser feita com base na relação entre a área de cobertura e o número de fragmentos de uma classe. Complementando a análise, foram utilizados os índices de dimensão fractal e o parâmetro de Pareto.

A dimensão fractal "D" e o parâmetro de Pareto "a" que foram plotados num gráfico de duas dimensões "forma x tamanho" (FIGURA 18 à FIGURA 21), podem ser usados como uma técnica para avaliar a estrutura espacial das classes bem como a coerência dessa distribuição.

FIGURA 18 - GRÁFICO DA DIMENSÃO FRACTAL "D" X PARÂMETRO DE PARETO "a" (SEM FILTRAGEM)

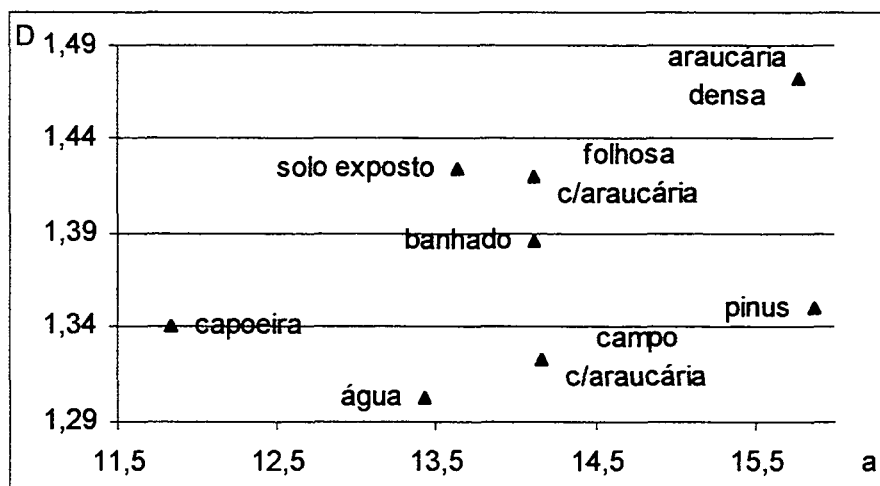


FIGURA 19 - GRÁFICO DA DIMENSÃO FRACTAL "D" X PARÂMETRO DE PARETO "a" (COMBINAÇÃO DE FILTROS)

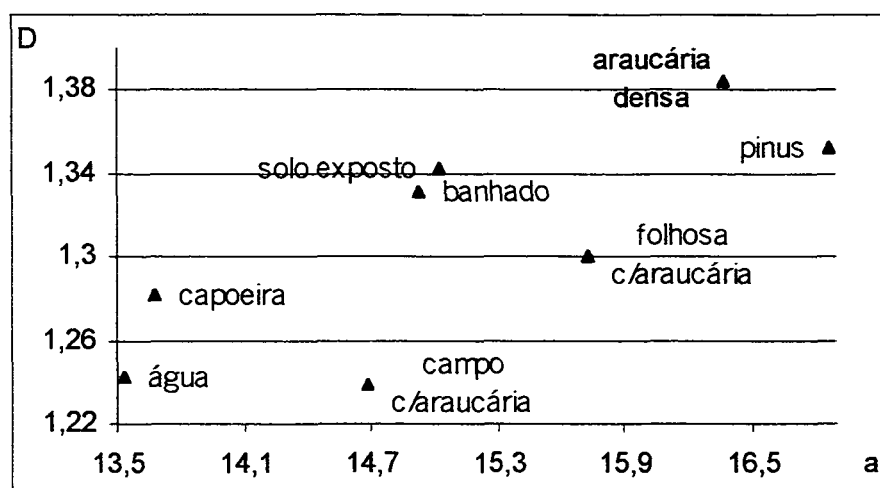


FIGURA 20 - GRÁFICO DA DIMENSÃO FRACTAL "D" X PARÂMETRO DE PARETO "a" (FILTRO DE MODA)

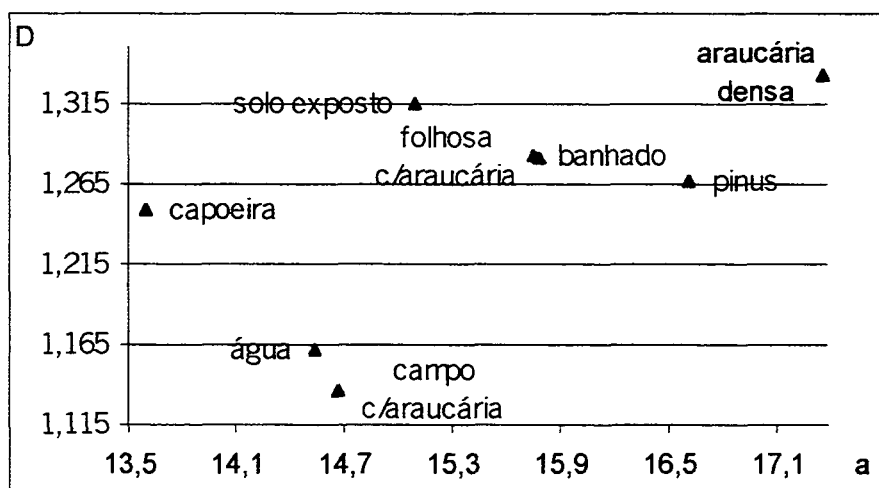
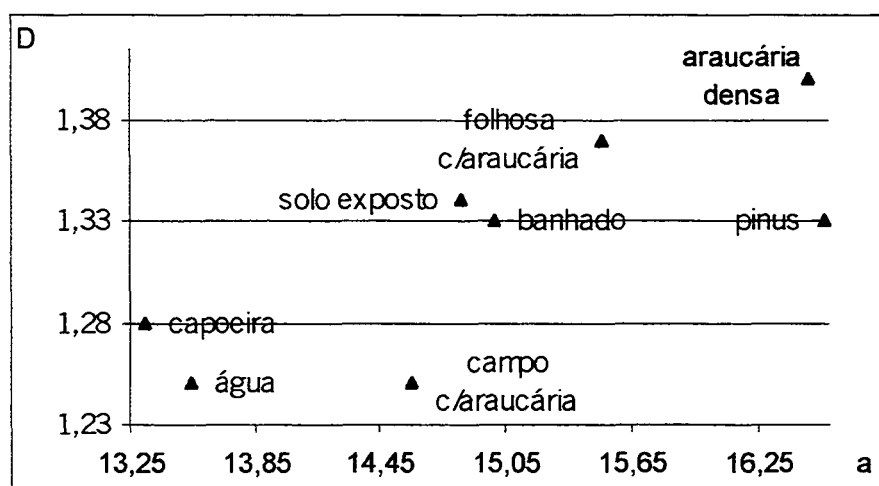


FIGURA 21 - GRÁFICO DA DIMENSÃO FRACTAL "D" X PARÂMETRO DE PARETO "a" (VALORES MÉDIOS)



Através dos gráficos, é possível fazer uma interpretação de como os fragmentos de cada classe estão distribuídos pela área. Observa-se que há uma discrepância de valores entre os gráficos, contudo, as classes obedecem, aproximadamente, a uma mesma ordem de distribuição. Essa distribuição, bem como a discriminação das classes pelos índices da dimensão fractal "D" e do parâmetro de Pareto "a" ficou mais perceptível quando se usou os valores médios, retirados da TABELA 11, esses resultados podem ser vistos na FIGURA 21.

Os gráficos mostram, não apenas que a classe de araucária densa domina a paisagem, mas também que essas regiões tendem a ser as maiores e tem a mais alta dimensão fractal "D" ( $D=1,4$ ); isto é, as florestas de araucária densa são normalmente extensas e tem a borda bastante complexa (sinuosa). Isto pode ser explicado porque, os remanescentes de araucária densa existentes na área, são de propriedade dos madeireiros que detêm grande extensões territoriais e, de certa forma, preservaram a floresta para uso próprio. Ela contrasta com a classe água, geralmente menor e com a borda mais simples (lisa), onde  $D=1,25$ . Esses resultados coincidem com aqueles obtidos por DeCOLA (1989), o qual encontrou para a floresta a maior dimensão fractal e a menor para a água.

A classe folhosas com araucária tem um valor de "D" relativamente alto ( $D = 1,37$ ), indicando que os fragmentos dessa classe apresentam bordas mais complexas (sinuosas) do que as classes capoeira ( $D = 1,28$ ) e campo com araucária ( $D = 1,25$ ) que manifestam bordas mais lisas.

Os valores da dimensão fractal "D" para a classe pinus encontrados nesse estudo ( $D = 1,33$ ), podem ser considerados relativamente elevados quando comparado aos resultados obtidos por DeJONG e BURROUGH (1995) e DeCOLA (1989). De acordo com esses autores, as regiões de povoamentos (pinus), tendem a ter um baixo valor de "D", refletindo as tendências das formas construídas pelo homem que normalmente criam as linhas e os blocos ou talhões (por exemplo, agricultura, povoamentos e áreas urbanas).

Contudo, os elevados valores de "D" encontrados para a classe pinus, podem ser explicados pelo sistema de distribuição dos talhões adotado pela empresa. Conforme descrito no item 3.1.3, o sistema de dispersão dos talhões, bem como a formação de corredores ecológicos modificaram a forma tradicional da distribuição dos talhões dos povoamentos em blocos. Na área de estudo os talhões de pinus possuem contornos mais irregulares e estão mais fragmentados, portanto, resultando em valores de dimensão fractal "D" mais elevados que o esperado.

O maior valor do parâmetro de Pareto "a", foi observado para a classe pinus ( $a = 16,57$ ) e para a classe araucária densa ( $a = 16,50$ ), indicando que os fragmentos destas classes são os de maior tamanho na paisagem, enquanto que os fragmentos de capoeira ( $a=13,33$ ) são os menores. Isto pode ser explicado, porque os fragmentos de capoeira muitas vezes são decorrentes de áreas de pequenas lavouras abandonadas. Essas áreas trabalhadas pelo homem, tendem a ter uma forma geométrica definida, que resulta num baixo valor de "D", e como são áreas pequenas, o parâmetro "a" também será baixo.

Esses resultados confirmam as observações, anteriormente feitas, através da análise da paisagem com base na TABELA 11. Da análise dessa tabela, onde foram relacionados o percentual de área coberta por cada classe com o respectivo percentual de fragmentos, observou-se que os fragmentos da classe pinus e da classe de araucária densa eram os maiores na paisagem, e apresentavam tamanhos equivalentes; enquanto que os fragmentos da classe capoeira foram considerados como os menores.

## 5 CONCLUSÕES

Através da imagem classificada do Landsat-5 TM, as classes de Floresta Ombrófila Mista puderam ser associadas aos padrões de cobertura através de medidas fractais. As classes definidas puderam ser caracterizadas pelos índices de dimensão fractal "D" e do parâmetro de Pareto "a".

Os processos de filtragem não tiveram interferência significativa nos valores relativos. Contudo, observou-se que a filtragem é um processo que deve ser feito com critério, procurando não alterar o contorno dos fragmentos. Para este estudo, o filtro de moda mostrou-se o mais indicado. No entanto, a escolha do processo de filtragem depende de muitas variáveis, como a fragmentação da imagem, o tamanho da janela utilizada no filtro e dos objetivos de cada trabalho.

O cruzamento dos índices ("D" x "a") permitiu uma análise da paisagem através da relação espacial ("forma" x "tamanho") entre as classes. Os resultados encontrados estão próximos de arranjos encontrados na literatura: as florestas apresentando os maiores fragmentos e com as bordas mais sinuosas resultam nos maiores valores de "D", e no outro extremo estão as classes água, capoeira e campo como os menores fragmentos e com os índices de "D" mais baixos. Essas considerações foram baseadas na fragmentação particular da área de estudo, não podendo afirmar se os índices calculados são os ideais para cada classe.

A análise fractal isoladamente não pôde caracterizar a paisagem de uma Floresta Ombrófila Mista, mas forneceu os índices de dimensão fractal "D" e do parâmetro de Pareto "a" para analisar a fragmentação desta área de estudo.

A análise fractal aplicada no estudo da paisagem diminuiu o grau de subjetividade. As expressões como "muito" ou "pouco" fragmentada, "grande" ou "pequeno" número de fragmentos, utilizadas para descrever uma paisagem, foram substituídas por índices da dimensão fractal "D" e do parâmetro de Pareto "a".

Este estudo explorou apenas a utilização da dimensão fractal "D" e do parâmetro de Pareto "a". No entanto, os recursos e aplicações da geometria fractal, na área florestal, ainda não estão sendo muito utilizados. A análise fractal, com a sua capacidade descritiva, poderá contribuir ainda mais para explicar a fragmentação e a dinâmica da paisagem florestal.



## 6 RECOMENDAÇÕES

A metodologia utilizada neste estudo, e os índices encontrados, poderão ser utilizados em algumas atividades propostas no projeto que está sendo desenvolvido na área de estudo:

- a) monitoramento do crescimento e da produção florestal (incremento, mortalidade e regeneração natural) em nível de espécie ou grupo de espécies;
- b) monitoramento da recuperação da capacidade produtiva das florestas manejadas em ciclos de cortes futuros;
- c) delineamento de prescrições alternativas de impacto ambiental reduzido.

Os índices fractais foram calculados para uma Floresta Ombrófila Mista, sendo as suas aplicações limitadas a uma região específica. Assim sendo, para uma análise mais completa desta formação, estudos em outras regiões são necessários, estabelecendo os parâmetros fractais para a flora e fauna.

É importante que a definição dos índices fractais também seja estabelecido para outras formações florestais. Neste caso é recomendado:

- a) determinar o valor dos índices da dimensão fractal "D" e do parâmetro de Pareto "a" considerados como "normal", "padrão", ou "ideal" para o desenvolvimento de cada tipologia das florestas brasileiras;
- b) determinar o valor dos índices da dimensão fractal "D" e do parâmetro de Pareto "a" considerados como "crítico", onde, a partir deste limite um fragmento ou determinada classe, não encontraria condições para se desenvolver e tenderia à extinção;
- c) associar os índices encontrados para a vegetação com índices determinados para a fauna, o que contribuirá para a integração do estudo fauna/flora;
- d) determinar os índices da dimensão fractal "D" e do parâmetro de Pareto "a", em nível de espécies de interesse (fauna/flora). Isto é, encontrar os índices mínimos necessários para garantir a sobrevivência de determinada espécie;
- e) aplicar a análise fractal em imagens com outras resoluções (ex. IKONOS);
- f) numa análise multi-temporal, que esses índices aplicados na interpretação da paisagem, indiquem como está evoluindo o processo de fragmentação.

## REFERÊNCIAS

- BARNESLEY, M.F.; DEVANEY, R.L.; MANDELBROT, B.B.; PEITGEN, H.; SAUPE, D.; VOSS, R.F. (Ed.). **The Science of Fractal Images**. New York: Springer-Verlag, 1988.
- BASSINGTHWAIGHTE, J.B.; LIEBOVITCH, L.S.; WEST, B.J. **Fractal Physiology**. New York: Oxford University Press, 1994.
- BATISTELLA, M.; SOARES FILHO, B.S. Ensaio comparativo de índices de fragmentação da paisagem em dois modelos de assentamento rural em Rondônia. In: GISBRASIL, 1999, Salvador. **Anais...** Salvador: gis99, 1999. 1 CD-ROM.
- BATTY, M. Fractals - geometry between dimensions. **New Scientist**, v.105, n.1450, p.31-35, 1985.
- BOYCE, S.G. **Landscape forestry**. New York: John Willey & Sons Ltd, 1995.
- BUNCE, R.G.H.; RYSZKOWSKI, L.; PAOLETTI, M.G. (Ed.). **Landscape ecology and agroecosystems**. USA: Lewis Publishers, 1993.
- BUNDE, A.; HAVLIN, S. **Fractals and Disordered Systems**. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- CHAPMAN, S.B. **Methods in plant ecology**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1976.
- CHEN, S.C. **Informações espectrais e texturais de vegetação da região amazônica a partir de dados do sensor TM do satélite Landsat**. São Paulo, 1996. (Tese de Doutorado em Geografia) Universidade de São Paulo.
- COHEN, J. A coefficient of agreement for nominal scale. **Educational and Psychological Measurement**, v.20 (1), p.37-46, 1960.
- DeCOLA, L. Fractal Analysis of a Classified Landsat Scene. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, v.55, n.5, p.601-610, 1989.
- DeJONG, S.M.; BURROUGH, P.A. A Fractal Approach to the Classification of Mediterranean Vegetation Types in Remotely Sensed Images. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, v.61, n.8, p.1041-1053, 1995.
- EMERSON, C.W.; LAM, N.S.; QUATTROCHI, D.A. Multi-scale Fractal Analysis of Image Texture and Pattern. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, v.65, n.1, p.51-61, 1999.

- FALCONER, K. **Techniques in Fractal Geometry**. England: John Willey & Sons Ltd, 1997.
- FORMAN, R.T.T.; GODRON, M. **Landscape Ecology**. USA: John Willey & Sons Ltd, 1986.
- FULLER, R.M.; GROOM, G.B.; JONES, A.R. The land cover map of Great Britain: an automated classification of Landsat Thematic Mapper Data. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, v.60, n.5, p.5531-562, 1994.
- GAINES, W.L.; HARROD, R.J.; LEHMKUHL, J.F. **Monitoring Biodiversity: Quantification and Interpretation**. Portland: PNW-GTR-433. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1999. 27 p. General Technical Report.
- GALVÃO, F. **Seminário sobre avaliação e relatório de impacto ambiental**. Curitiba: FUPEF, 1989.
- GOODCHILD, M.F.; MARK, D.M. **The Fractal Nature of Geographic Phenomena**. Annals of the Association of American Geographers, v.77, n.2, p.265-278, 1987.
- HAINES-YOUNG, R.; GREEN, D.R.; COUSINS, S. (Ed.). **Landscape ecology and geographic information systems**. London: Taylor & Francis Ltd, 1993.
- HANSSON, L.; FAHRIG, L.; MERRIAM, G. (Ed.). **Mosaic landscape and ecological process**. London: Chapman&Hall, 1995.
- HILL, D.B. Forest Fragmentation and its Implications in Central New York. **Forest Ecology and Management**, v.12, n.2, p.113-122, 1985.
- HORD, R.M. **Remote sensing - methods and applications**. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- HOWARD, J.A. **Remote Sensing of Forest Resources**. London: Chapman & Hall, 1991.
- HUXHOLD, W.E.; LEVINSOHN, A. G. **Managing Geographic Information System Projects**. New York: Oxford University Press, 1995.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira nº1**. Rio de Janeiro, 1992.
- JENSEN, J.R. **Introductory Digital Image Processing**. New Jersey: Prentice Hall, 1986.

LaGRO Jr., J. Assessing Patch Shape in Landscape Mosaics. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, v.57, n.3, p.285-293, 1991.

LAM, N.S. Description and Measurement of Landsat TM Images Using Fractals. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, v.56, n.2, p.187-195, 1990.

LANYON, S.M. How to design a dissertation project. **BioScience**, v.45, n.1, p.40-42, 1995.

LAWRENCE, R.L.; RIPPLE, W.J. Determining patch perimeters in raster image processing and geographic information systems. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, n.6, p.1255-1259, 1996.

LEITE, P.F. **As diferentes unidades fitoecológicas da região sul do Brasil - proposta de classificação**. Curitiba, 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

LEVITT, S.P.; DWOLATZKY, B.; MEYER, A.S. Aerial photograph interpretation for electrical reticulation. Johannesburg, 1997. **Revision** 1.01 (SL 106.101), University of the Witwatersrand.

LI, Z.; SUI, H. Automated generalisation of contour maps. **GIM International**, v.14, n.7, p.52-54, 2000.

LILLESAND, T.M.; KIEFER R.W. **Remote sensing and image interpretation**. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1987.

MANDELBROT, B.B. **Objetos Fractais, forma, acaso e dimensão**. Portugal: Gradativa, 1991.

MANDELBROT, B.B. **The fractal geometry of nature**. New York: W.H. Freeman and Company, 1983.

MERRIAM, G. Series foreword. In: HANSSON, L.; FAHRIG, L.; MERRIAM, G. (Ed.). **Mosaic landscape and ecological process**. London: Chapman&Hall, 1995. p.xi.

MILNE, B.T. Lessons from applying fractal models to landscape patterns. In: TURNER, M.G.; GARDNER, R.H. (Ed.). **Quantitative methods in landscape ecology - The analysis and interpretation of landscape heterogeneity**. New York: Springer-Verlag, 1991. p.199-235.

MORISSETE, J.T; KHORRAM, S. Accuracy assessment curves for satellite-based change detection. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, v.66, n.7, p.875-880, 2000.

NOSS, R.F. Foreword. In: HANSSON, L.; FAHRIG, L.; MERRIAM, G. (Ed.). **Mosaic landscape and ecological process**. London: Chapman&Hall, 1995. p.xii.

NOVO, E.M.L.M. **Sensoriamento Remoto - Princípios e aplicações**. São Paulo: Editora E. Blucher Ltda, 1993.

OLSEN, E.R.; RAMSEY, R.D.; WINN D.S. A Modified Fractal Dimension as a Measure of Landscape Diversity. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, v.59, n.10, p.1517-1520, 1993.

OOSTING, H.J. **The study of plant communities**. San Francisco and London: W.H. Fredman and Company. 1956.

PACHEPSKY, Y.A.; RITCHIE, J.C. Seasonal changes in fractal landscape surface roughness estimated from airborne laser altimetry data. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, v.19, n.13, p.2509-2516, 1998.

PALMA, H.J. Medición en Fotografías aéreas Usando Fractales. **Quebracho**, nº7, p.61-66, 1999.

PALMER, M.W. Fractal geometry: a tool for describing spatial patterns of plant communities. **Vegetatio**, v.75, p.91-102, 1988.

PIZZATTO, L. **Relatório de Execução de Planos de Manejo Florestal - Informações até Dez/96**. Indústrias Pedro N. Pizzatto, 1997. Relatório técnico.

PIZZATTO, L. **Relatório de Execução de Planos de Manejo Florestal - Informações até Dez/97**. Indústrias Pedro N. Pizzatto, 1998. Relatório técnico.

POLIDORI, L. Description of Terrain as a Fractal Surface, and Application to Digital Elevation Model Quality Assessment. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, v.57, n.10, p.1329-1332, 1991.

PONTIUS Jr., R.G. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, v.66, n.8, p.1011-1016, 2000.

PUZACHENKO, Y.G.; ALESHCHENKO, G.M.; MOLCHANOV, G.S. Multidimensional analysis of aerial photographs in study of landscape structure. **Mapping Sciences and Remote Sensing**, v.37, n.1, p.40-54, 2000.

QIU, H.; LAM, N.S.; QUATTROCHI, D.A ; GAMON, J.A Fractal Characterization of Hyperspectral Imagery. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, v.65, n.1, p.63-71, 1999.

RESEARCH SYSTEMS. **ENVI Online guide**. Boulder, 1999. Manual.

RICHARDS, J.A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 2. ed. Berlin: Springer-Verlag, 1993.

RICOTTA, C.; AVENA, G.C. Fractal modelling of the remotely sensed two-dimensional net primary production pattern with annual cumulative AVHRR NDVI data. **International Journal of Remote Sensing**, v.19, n.12, p.2413-2418, 1998.

RYN, S.V. der; COWAN, S. **Ecological design**. Washington: Island Press, 1996.

SANQUETTA, C.R. **Inventário Contínuo em Floresta Natural - implantação de um sistema de monitoramento de crescimento e produção**. Indústrias Pedro N. Pizzatto / FUPEF, 1998.

SANTANGELO, H.P. Qué longitud tiene la costa de Gran Bretaña? **Geoinformacion**, Noviembre/Diciembre, p.48-53, 1999.

SCHOWENGERDT, R.A. **Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing**. Orlando: Academic Press, 1983.

SERRA, C.P.; KARAS, E.W. **Fractais, gerados por sistemas dinâmicos complexos**. Curitiba: Champagnat, 1997.

SILVEIRA, P. **Deteção de alterações na cobertura vegetal ocasionadas pela expansão urbana em uma região do litoral paranaense, através de técnicas de sensoriamento remoto**. Curitiba, 1997. Dissertação. (Mestrado em Manejo Florestal) Universidade Federal do Paraná.

SINGH, R.B. Role of geographical monitoring and forecasting in ecosystem modelling and management: an introduction. In: SINGH, R.B. **Global environmental change**. Rotterdam: A.A.Balkema, 1995. p.1-21.

SOCIEDADE DE PESQUISA EM VIDA SELVAGEM E EDUCAÇÃO AMBIENTAL - SPVS. **Manual para recuperação da reserva florestal legal**. Curitiba: FNMA, 1996.

SWAIN, P.H.; DAVIS, S.H. **Remote sensing: the quantitative approach**. New York: McGraw Hill, 1978.

THAPA, K.; BOSSLER, J. Accuracy of Spatial Data Used in Geographic Information Systems. **Photogrametric Engineering and Remote Sensing**, v.58, n.6, p.835-841, 1992.

TURNER, M.G.; GARDNER, R.H. (Ed.). **Quantitative methods in landscape ecology - The analysis and interpretation of landscape heterogeneity**. New York: Springer-Verlag, 1991.

VASIL'YEV, L.N.; KACHALIN, A.B.; MORALEV, V.M.; TEREKHOV, Y.N.; TYUFLIN, A.S. The multifractal character of lineament density on the Kola Peninsula. **Mapping Sciences and Remote Sensing**, v.33, n.2, p.135-143, 1996.

VEDYUSHKIN, M.A. Fractal properties of forest spatial structure. **Vegetatio**, v.113, p.65-70, 1994.

VERBYLA, D.L. **Satellite remote sensing of natural resources**. New York: Lewis Publishers, 1995.

VOSS, C.C.; ZONNENVELD, J.I.S. Patterns and process in a landscape under stress: the study area. In: VOSS, C.C.; OPDAM, P. (Ed.). **Landscape ecology of a stressed environment**. London: Chapman Hall, 1993. p.1-27.

WALSH, S.J.; DAVIS, F.W. Application of remote sensing and geographic information systems in vegetation science: introduction. In: WALSH, S.J.; DAVIS, F.W.; PEET, R.K. (Ed.). **Application of remote sensing and geographic information systems in vegetation science**. Sweden: Opullus Press, 1994. p.610-613.

WATRIN, O. dos S. **Dinâmica da paisagem na Amazônia oriental utilizando técnicas de geoprocessamento**. São José dos Campos, 1994. Dissertação. (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto de Pesquisas Espaciais.

WATZLAWICK, L.F. **Avaliação de classificadores a partir de dados coletados através de videografia multiespectral**. Porto Alegre, 2000. Dissertação. (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

WIENS, J.A. Landscape mosaics and ecological theory. In: HANSSON, L.; FAHRIG, L.; MERRIAM, G. (Ed.). **Mosaic landscape and ecological process**. London: Chapman&Hall, 1995. p.1-26.

ZEIDE, B. Primary Unit of the Tree Crown. **Ecology**, v.74, n.5, p.1598-1602, 1993.

ANEXO 1 - PLANILHA DE CÁLCULO PARA A REGRESSÃO - DIMENSÃO FRACTAL "D" PARA A CLASSE ARAUCÁRIA Densa (COMBINAÇÃO DE FILTROS)

	AREA	PERIMETER	log P	log S
1	5899500,282	105850,517	11,56978	15,59038
2	5290199,935	114275,049	11,64636	15,48137
3	861300,409	18375,726	9,818786	13,6662
4	782550,278	14852,560	9,605928	13,57031
5	619199,962	14701,678	9,595717	13,33618
6	452249,973	10878,519	9,294545	13,02199
7	369449,986	10337,273	9,243511	12,81977
8	299699,976	7337,787	8,900793	12,61054
9	280349,887	7405,066	8,90992	12,54379
10	277650,151	7836,609	8,966561	12,53412
11	271800,010	5766,243	8,659776	12,51282
12	205200,096	4338,304	8,375239	12,23174
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
590	1350,000	144,853	4,975719	7,20786
591	1350,000	144,853	4,975719	7,20786
592	1350,000	144,853	4,975719	7,20786
593	1350,000	144,853	4,975719	7,20786



ANEXO 2 - RESUMO DOS RESULTADOS DA REGRESSÃO - DIMENSÃO  
FRACTAL "D" PARA A CLASSE ARAUCÁRIA DENSA  
(COMBINAÇÃO DE FILTROS)

RESUMO DOS RESULTADOS

<i>Estatística de regressão</i>	
R <sup>2</sup> ajustado	0,981055
Erro padrão	0,128535
Observações	593

ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	592,0552	592,0552	35835,8	0
Resíduo	592	11,41624	0,016521		
Total	593	603,4714			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	-0,08463	0,031159	-2,7159	0,006775
Variável X 1	0,691807	0,003654	189,3035	0

ANEXO 3 - PLANILHA DE CÁLCULO PARA A REGRESSÃO - PARÂMETRO DE PARETO "a" PARA A CLASSE ARAUCÁRIA DENSA (COMBINAÇÃO DE FILTROS)

AREA	Ordem	ranking	lnR	lnS
5899500	1	2	0,693147	15,59038
5290200	2	3	1,098612	15,48137
861300	3	4	1,386294	13,6662
782550	4	5	1,609438	13,57031
619200	5	6	1,791759	13,33618
452250	6	7	1,94591	13,02199
369450	7	8	2,079442	12,81977
299700	8	9	2,197225	12,61054
280350	9	10	2,302585	12,54379
277650	10	11	2,397895	12,53412
271800	11	12	2,484907	12,51282
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
1350	590	691	6,53814	7,207844
1350	591	592	6,53814	7,207844
1350	592	593	6,53814	7,207844
1350	593	594	6,542472	7,20783

# ANEXO 4 - RESUMO DOS RESULTADOS DA REGRESSÃO - PARÂMETRO DE PARETO "a" PARA A CLASSE ARAUCÁRIA DENSA (COMBINAÇÃO DE FILTROS)

## RESUMO DOS RESULTADOS

<i>Estatística de regressão</i>	
R <sup>2</sup> ajustado	0,984106
Erro padrão	0,168804
Observações	593

## ANOVA

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F significação</i>
Regressão	1	1222,684	1222,684	42909,14	0
Resíduo	592	19,71834	0,028495		
Total	593	1242,402			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>
Interseção	16,37266	0,038934	420,5269	0
Variável X 1	-1,44719	0,006986	-207,145	0

## ANEXO 5 - MATRIZES DE CONFUSÃO

TABELA 1 - MATRIZ DE CONFUSÃO DAS 3 BANDAS (3, 4 e 5)(PIXEL)

Acurácia Total = 95,00%

Kappa = 0.94

Classificação ( $x_{+i}$ )	Amostras de Treinamento ( $x_{+j}$ )								Total
	Água	Pinus	Campo	Solo	Araucária	Folhosa	Capoeira	Banhado	
Água	287								287
Pinus		955							957
Campo c/araucária			200						200
Solo exposto			2	334	2			2	346
Araucária densa		2		1	446	4			453
Folhosa c/araucária						324	46	3	373
Capoeira					6	46	176	21	249
Banhado				19		6	2	475	496
Total	287	957	202	354	454	380	224	501	3359

TABELA 2 - MATRIZ DE CONFUSÃO DAS 4 BANDAS (3, 4, 5 e 7)(PIXEL)

Acurácia Total = 95,50%

Kappa = 0.95

Classificação ( $x_{+i}$ )	Amostras de Treinamento ( $x_{+j}$ )								Total
	Água	Pinus	Campo	Solo	Araucária	Folhosa	Capoeira	Banhado	
Água	287								287
Pinus		955							955
Campo c/araucária			201						201
Solo exposto			1	338	2			4	345
Araucária densa		2		1	446	4			453
Folhosa c/araucária					1	328	42	4	375
Capoeira		2			5	42	180	20	247
Banhado				15		6	2	473	496
Total	287	957	202	354	454	380	224	501	3359

## ANEXO 6 - MATRIZES DE CONFUSÃO

TABELA 3 - MATRIZ DE CONFUSÃO - 3 COMPONENTES PRINCIPAIS (PIXEL)

Acurácia Total = 95,1%

Kappa = 0.94

Classificação ( $x_{+i}$ )	Amostras de Treinamento ( $x_{+j}$ )								Total
	Água	Pinus	Campo	Solo	Araucária	Folhosa	Capoeira	Banhado	
Água	287								287
Pinus		956							956
Campo c/araucária			200	1					201
Solo exposto			2	339	1			5	345
Araucária densa		1			445	3			449
Folhosa c/araucária						325	47	7	379
Capoeira					8	44	175	20	247
Banhado				14		8	2	469	495
Total	287	957	202	354	454	380	224	501	3359

TABELA 4 - MATRIZ DE CONFUSÃO - CLASSIFICAÇÃO FINAL - BANDAS  
ORIGINAIS (3, 4, 5 E 7)(PIXEL)

Acurácia Total= 91,5%

Kappa= 0,90

Classificação ( $x_{+i}$ )	Amostras de Treinamento ( $x_{+j}$ )								Total
	Água	Pinus	Banhado	Campo	Solo	Folhosa	Capoeira	Araucária	
Água	62								62
Pinus		100						2	102
Campo c/araucária			77				3		95
Solo exposto				87			1		88
Araucária densa			5	3	58		7		73
Folhosa c/araucária						114	7	2	123
Capoeira			1			10	80	4	94
Banhado						3	1	133	140
Total	62	103	82	90	71	127	99	143	777